KTA 3101.3
Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren
Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung

Fassung 2022-11

Frühere Fassung der Regel: 2015-11 (BAnz AT 08.01.2016 B4)

Inhalt

Seite

Grundlagen 2
1 Anwendungsbereich 2
2 Begriffe 2
3 Grundsätzliche Anforderungen an die thermische und mechanische Auslegung von Kernbauteilen 3
3.1 Allgemeines 3
3.2 Sicherheitstechnische Anforderungen 4
4 Nachweiskriterien 6
4.1 Komponentenübergreifende Anforderungen 6
4.2 Brennelementstruktur, einschließlich Brennelementkasten beim SWR 7
4.3 Brennstab 10
4.4 Steuerelemente 12
4.5 Drosselkörper 15
5 Weitere allgemeine Anforderungen 15
5.1 Anforderungen an die Nachweisführung bei der Auslegung 15
5.2 Anforderungen an die Herstellung 16
5.3 Anforderungen an den Transport 17
5.4 Anforderungen an Einsatzplanung und Betrieb 17
Anhang A: Tabellarische Übersicht der sicherheitstechnischen Anforderungen 18
Anhang B: Anforderungen an analytische und experimentelle Festigkeitsnachweise 24
Anhang C: Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird 41

Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz -AtG-), um die im AtG, im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten sowie in den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) und den „Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Aufgabe der Regelreihe KTA 3101 ist es, Festlegungen zur Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren zu treffen. Zur Regel KTA 3101 gehören drei Teile:

Teil 1: Grundsätze der thermohydraulischen Auslegung,

Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme und

Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung

(3) In diesem Teil 3 der Regelreihe 3101 wird die erforderliche Vorsorge gemäß (1) für Kernkraftwerke bezogen auf die mechanische, thermische und thermomechanische Auslegung des Reaktorkerns konkretisiert.

Hinweis:

Im Folgenden werden die Aspekte mechanische, thermische und thermomechanische Auslegung unter dem Begriff thermomechanische Auslegung zusammengefasst.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel gilt für ortsfeste Kernkraftwerke mit Druck- oder Siedewasserreaktoren. Sie behandelt die Anforderungen, die an die thermomechanische Auslegung von Kernbauteilen für den bestimmungsgemäßen Betrieb, Störfälle, sehr seltene Ereignisse (Betriebstransienten mit unterstelltem Ausfall der Reaktorschnellabschaltung (ATWS)), Einwirkungen von Innen (EVI) und Außen (EVA: Bemessungserdbeben) sowie für Notstandsfälle (Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz) zu stellen sind. Weiterhin beinhaltet sie Anforderungen an die Einsatzplanung und den Betrieb, die sich aus der Auslegung ergeben.

(2) Zum Geltungsbereich dieser Regel gehören auch Anforderungen an die Herstellung und den Transport von unbestrahlten Kernbauteilen sowie die Handhabbarkeit der Kernbauteile und deren Lagerfähigkeit im Kernkraftwerk.

(3) Nicht Bestandteil dieser Regel sind Anforderungen an

a) die thermohydraulische und nukleare Auslegung des Reaktorkerns, die in KTA 3101.1 und 3101.2 geregelt sind,

b) die mechanische und thermische Auslegung der druckführenden Wandung der Kerninstrumentierung, die in KTA 3201.2 festgelegt sind,

c) die Auslegung der Lastanschlagpunkte von Kernbauteilen, die in KTA 3905 festgelegt sind,

d) die Kritikalitätssicherheit bei Lagerung und Handhabung, die in KTA 3602 geregelt sind,

e) die Kritikalitätssicherheit beim Brennelementwechsel, die in KTA 3107 festgelegt sind,

f) die Kernbauteile bei der Zwischenlagerung in kraftwerksexternen Einrichtungen und der Entsorgung.

(4) Anforderungen an Neutronenquellen, Vergiftungselemente (Absorberelemente), Blindelemente, neutronenabsorbierende Einsätze und an die Kerninstrumentierung werden in dieser Regel nicht behandelt.

2 Begriffe

(1) Absorberelement (DWR)

Absorberelemente werden im ersten Zyklus eines DWR zur Kompensation der Überschussreaktivität und zur Aufrechterhaltung eines negativen Moderatortemperaturkoeffizienten im Reaktorkern eingesetzt.

(3) Sicherheitstechnische Anforderungen

Sicherheitstechnische Anforderungen sind Konkretisierungen der Nachweisziele aus den SiAnf bezogen auf die Kernbauteile.

(2) Nachweiskriterium

Ein Nachweiskriterium ist ein im Zuge der Nachweisführung als eingehalten nachzuweisendes Kriterium.

(3) Nachweisziel

Ein Nachweisziel ist ein sicherheitstechnisches Ziel der Nachweisführung, welches durch die Einhaltung von Nachweiskriterien erreicht wird.

(4) Bauteil

Ein Bauteil ist ein nach baulichen oder funktionellen Gesichtspunkten abgegrenzter Teil einer Komponente.

(5) Brennelement

Das Brennelement besteht aus Bauteilen, z. B. den Abstandhaltern und den Brennstäben. Alle Bauteile des Brennelementes mit Ausnahme der Brennstäbe bilden die Brennelementstruktur.

(6) Brennstab

Der Brennstab ist ein beidseitig gasdicht verschlossenes, mit Kernbrennstoff gefülltes Metallrohr.

(7) Brennstabhülle

Unter dem Begriff Brennstabhülle wird im Folgenden das Brennstabhüllrohr einschließlich der Endstopfen und aller vorhandenen Schweißnähte verstanden.

(8) Drosselkörper

Ein Drosselkörper besteht aus einem Kopfstück mit daran befestigten Drosselfingern, die in die Führungsrohre eines DWR-Brennelementes hineinragen, um den Kühlmitteldurchfluss zu begrenzen.

(9) Einwirkung, externe

Bei einer externen Einwirkung handelt es sich um auf Komponenten oder Bauteile einwirkende externe Kräfte oder Medien mit physikalischem oder chemischem Einfluss oder eine Kombination derselben.

(10) Einwirkung, interne

Bei einer internen Einwirkung handelt es sich um auf Komponenten oder Bauteile einwirkende komponentenintern erzeugte Kräfte oder Medien mit physikalischem oder chemischem Einfluss oder eine Kombination derselben.

(11) Fretting

Fretting ist Materialabtrag, der an der Kontaktfläche zwischen zwei Bauteilen unter Belastungen bei Relativbewegung auftritt.

(12) Herstellung

Herstellung ist die Gesamtheit aller Fertigungs- und Prüfschritte, die zum Umsetzen der Konstruktion in ein Produkt erforderlich sind.

(13) Kernbauteil

Ein Kernbauteil ist ein Bauteil oder eine Komponente, aus denen der Reaktorkern zusammengesetzt ist. Hierzu gehören: Brennelemente, Steuerelemente, Drosselkörper, Vergiftungs- und Blindelemente, Brennelementkästen und Kastenbefestigungen, Neutronenquellen, neutronenabsorbierende Einsätze der Brennelemente und Messlanzen.

(14) Komponente

Eine Komponente ist ein nach baulichen oder funktionellen Gesichtspunkten abgegrenzter Teil eines Systems, in diesem Fall des Reaktorkerns. Die Komponenten des Reaktorkerns werden als Kernbauteile bezeichnet.

(15) Lagerfähigkeit

Kernbauteile sind im Sinne dieser Regel lagerfähig, wenn sie an den vorgesehenen Orten im Kernkraftwerk ohne Einschränkung für die weitere Verwendung gelagert werden können. Vorgesehene Orte sind z. B. das Wareneingangslager (für Kernkomponenten ohne Kernbrennstoff), das Trockenlager (für Brennelemente vor der Bestrahlung) und das Nasslager.

Hinweis:
Aspekte der Kritikalität und des Strahlenschutzes werden in dieser Regel nicht behandelt.

(16) Lagerung

Die Lagerung von Kernbauteilen im Sinne dieser Regel umfasst die Vorhaltung der Komponenten im Kernkraftwerk vor ihrem Einsatz sowie die Aufbewahrung zwischen Einsätzen oder nach der endgültigen Entladung aus dem Reaktorkern bis hin zum Abtransport zur Konditionierung oder in ein gesondertes Zwischen- oder Endlager.

(17) Sicherheitsebene

Eine Sicherheitsebene umfasst eine Kategorie von Anlagenzuständen mit definierten gleichartigen Randbedingungen:

a) Sicherheitsebene 1: Normalbetrieb
b) Sicherheitsebene 2: anomaler Betrieb
c) Sicherheitsebene 3: Störfall
d) Sicherheitsebene 4a: Sehr seltene Ereignisse

(18) Steuerelement

Ein Steuerelement besteht aus der Steuerelementstruktur (Tragstruktur) sowie absorberführenden Bauteilen.

Hinweis:
Beim SWR wird das gesamte Steuerelement auch als Steuerstab bezeichnet.

(19) Validierung

Validierung ist der Prozess des Nachweises, dass die Eigenschaften eines Modells die abzubildenden realen Gegebenheiten (z. B. physikalische oder chemische Zustände/Vorgänge) im Hinblick auf die beabsichtigte Nutzung des Modells ausreichend genau reproduzieren.

(20) Verifikation

Verifikation ist der Prozess des Nachweises, dass das implementierte Berechnungsmodell die konzeptionelle Beschreibung des Modells (vorgegebene Spezifikation) richtig wiedergibt.

(21) Versagensgrenze

Die Versagensgrenze ist ein quantitatives Kriterium, bei dessen Überschreiten die Komponente die an sie gestellte Anforderung (z. B. Dichtheit, Funktionalität) nicht mehr erfüllt.

3 Grundsätzliche Anforderungen an die thermomechanische Auslegung von Kernbauteilen

3.1 Allgemeines

(1) In dieser Regel werden ausgehend vom Sicherheitskonzept der SiAnf und der dort formulierten Schutz- und Sicherheitsziele, die spezifischen Nachweisziele und Nachweiskriterien für die in dieser Regel behandelten Sicherheitsebenen konkretisiert (siehe **Bild 3.1-1**).

(2) Die in dieser Regel formulierten Anforderungen gelten für den Normalbetrieb (Sicherheitsebene 1), den anomalen Betrieb (Sicherheitsebene 2), Störfälle (Sicherheitsebene 3), die für diese Regel zu betrachtenden sehr seltenen Ereignisse (Betriebstransienten mit unterstelltem Ausfall der Reaktorschnellabschaltung (ATWS) auf Sicherheitsebene 4a) sowie Einwirkungen von Innen (EVI) und Außen (EVA: Bemessungserdbeben) und für Notstandsfälle (Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz). Soweit für die Sicherheitsebenen unterschiedliche Anforderungen zu stellen sind, ist dies angegeben.

(3) Für EVI und EVA sowie für Notstandsfälle, die im übergeordneten Regelwerk nicht in die Sicherheitsebenen eingeordnet sind, werden in dieser Regel die gleichen Anforderungen wie auf Sicherheitsebene 3 gestellt.

(4) Die Kernbauteile sind so auszulegen und zu betreiben, dass gestaffelt nach den jeweiligen Anforderungen der Sicherheitsebenen 1 bis 4a die grundlegenden Schutzziele

- Kühlung der Brennelemente (K),
- Kontrolle der Reaktivität (R),
- Einschluss der radioaktiven Stoffe (B)

sowie das grundlegende radiologische Sicherheitsziel

- Begrenzung der Strahlenexposition (S)

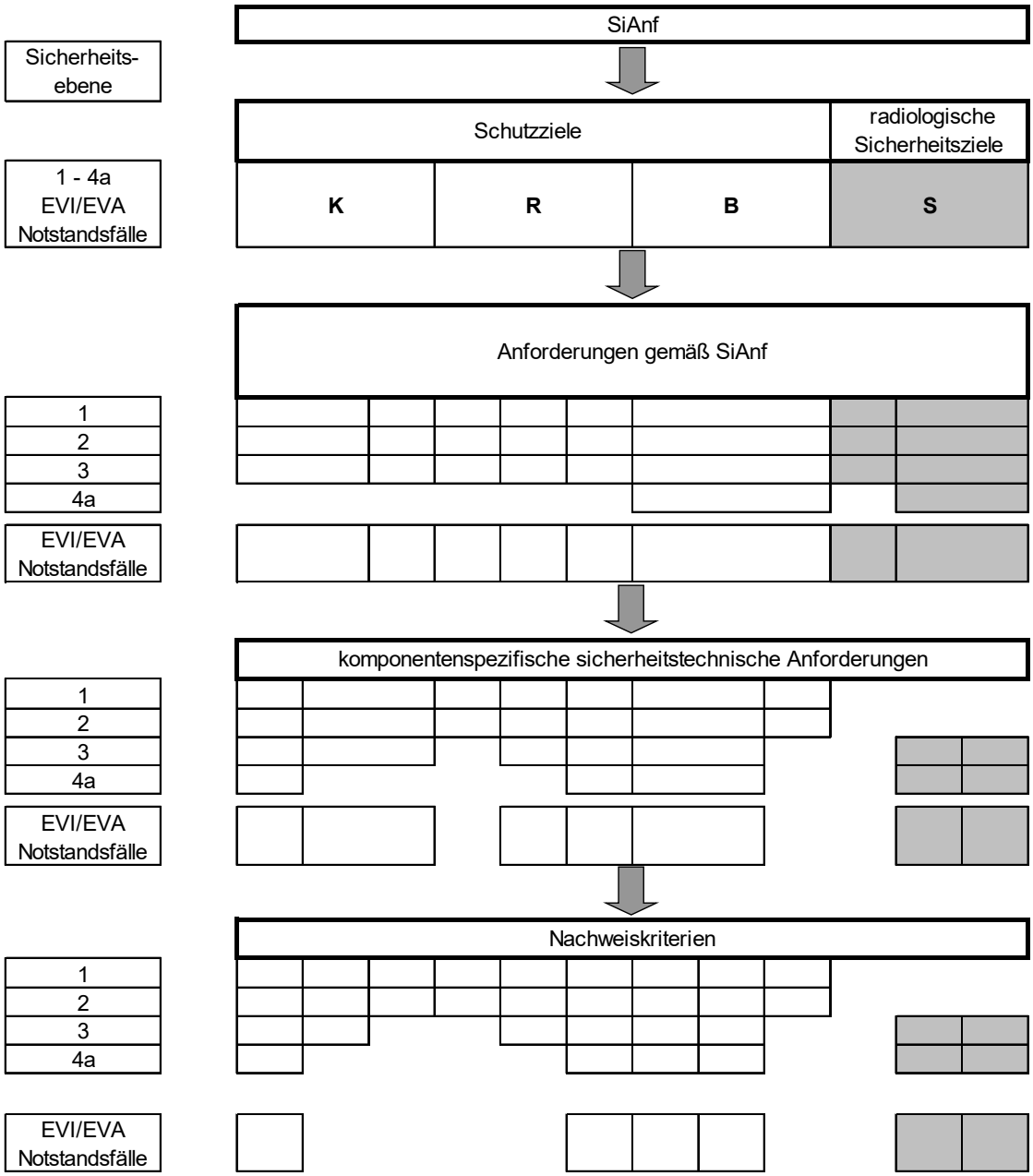
eingehalten werden.

(5) Die Auslegung und der Betrieb der Kernbauteile müssen so erfolgen, dass die aus den zu erwartenden externen und internen Einwirkungen resultierenden mechanischen, thermischen, chemischen und strahlungsbedingten Beanspruchungen sicher abgetragen werden.

(6) Die Beanspruchungen werden bestimmt von den Betriebszuständen auf der Sicherheitsebene 1 und den auf den Sicherheitsebenen 2 bis 4a unterstellten Ereignissen. Die sicherheitstechnischen Anforderungen leiten sich aus den Schutzzielen und dem radiologischen Sicherheitsziel ab und sind ggf. auf den vier Sicherheitsebenen unterschiedlich.

(7) In Abschnitt 3.2 werden die komponentenspezifischen sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich für die Kernbauteile aus dem radiologischen Sicherheitsziel und den Schutzzielen ergeben, nach Sicherheitsebenen gegliedert angegeben. Hieraus werden in Abschnitt 4 Nachweiskriterien abgeleitet, deren Einhaltung – jeweils für jede Sicherheitsebene – die Erfüllung der Nachweisziele und damit der sicherheitstechnischen Anforderungen gewährleistet.

Hinweis:
Anhang A enthält eine Gegenüberstellung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Kernbauteile zu den übergeordneten Anforderungen (Sicherheitsziel, Schutzziele) und Nachweiszielen aus den SiAnf.



K- Kühlung der Brennelemente
R - Kontrolle der Reaktivität
B - Einschluss der radioaktiven Stoffe
S - Einhaltung radiologischer Sicherheitsziele

Bild 3.1-1 Schematische Darstellung des Sicherheitskonzepts für die in dieser Regel behandelten Sicherheitsebenen

Hinweis:
Es handelt sich um eine schematische Verbildlichung der hierarchischen Zusammenhänge. Freilassungen machen deutlich, dass nicht zu jeder Kombination Anforderungen erforderlich sind.

3.2 Sicherheitstechnische Anforderungen

3.2.1 Brennelemente (beim SWR einschließlich Brennelementkasten)

3.2.1.1 Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) und Sicherheitsebene 2 (Anomaler Betrieb)

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf den Sicherheitsebenen 1 und 2 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität erforderlichen Geometrie- (Form und Lage) und Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

b) Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass zulässige Werte der Leistung und der Leistungsdichte eingehalten werden.

Hinweis:
Hinsichtlich der Einhaltung dieser Anforderung siehe auch KTA 3101.2, Abschnitte 3.2 und 3.3.

c) Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderlichen Geometrie- (Form und Lage) und Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

d) Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die in KTA 3101.1 festgelegten Anforderungen hinsichtlich der kritischen Siedezustände/Wärmestromdichten eingehalten werden.

Hinweis:

Hinsichtlich der Einhaltung von Anforderungen an kritische Siedezustände oder Wärmestromdichten siehe KTA 3101.1, Abschnitte 3.2 und 3.3.

e) Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die Dichtheit der Brennstäbe gewährleistet wird.

Hinweis:

Erfahrungsgemäß zeigt sich, dass auch bei sorgfältigster Auslegung Undichtigkeiten der Brennstäbe nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Bei solchen Ereignissen wird im Einzelfall festgelegt, wie weiter zu verfahren ist. Die Anlage ist so ausgelegt, dass bei Undichtigkeiten der Brennstäbe mit geringer Freisetzung in den Primärkreislauf keine Überschreitung der zulässigen Abgaberaten radioaktiver Produkte an die Umgebung eintritt.

f) Verwendung geeigneter Werkstoffe, um die Strahlenexposition so gering wie möglich zu halten (ALARA).

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 1-1 angegeben.

3.2.1.2 Sicherheitsebene 3 (Störfälle)

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf der Sicherheitsebene 3 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität und Leistungsdichte erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

b) Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

c) Auslegung der Brennelemente derart, dass ereignisspezifische Anforderungen an die Dichtheit der Brennstäbe gewährleistet werden.

Hinweis:

Die Konkretisierung der ereignisspezifischen Anforderungen erfolgt in Kapitel 4.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebene 3, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 1-2 angegeben.

3.2.1.3 Sicherheitsebene 4a

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf der Sicherheitsebene 4a lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität und Leistungsdichte erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

b) Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderlichen Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebene 4a, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 1-3 angegeben.

3.2.2 Steuerelemente

3.2.2.1 Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) und Sicherheitsebene 2 (anomaler Betrieb)

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf den Sicherheitsebenen 1 und 2 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass die zur Erfüllung der Anforderungen von KTA 3101.2 und KTA 3103 hinsichtlich Leistungsregelung und Abschaltung erforderliche Geometrie und Form der Steuerelemente, einschließlich der Menge, Geometrie (Form und Lage) und den Materialeigenschaften des Absorbermaterials eingehalten sind.

b) Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass sie unter Berücksichtigung ihres Eigengewichts und der auftretenden Belastungen hinreichend schnell gemäß den Anforderungen von KTA 3101.2 und KTA 3103 in den Reaktorkern eingebracht werden können.

c) Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.

d) Verwendung geeigneter Werkstoffe, um die Strahlenexposition so gering wie möglich zu halten (ALARA).

e) Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.

Hinweise:

(1) Die zulässigen radiologischen Belastungen ergeben sich aus der StrlSchV und - soweit vorhanden - den Genehmigungswerten der Kraftwerksanlage.

(2) Radiologische Belastungen können sich z. B. durch die Werkstoffwahl oder beim SWR durch Tritiumbelastung bei Undichtigkeit der Absorberhülle eines Steuerstabs mit Bor als Absorbermaterial ergeben.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 2-1 angegeben.

3.2.2.2 Sicherheitsebene 3 (Störfälle)

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf der Sicherheitsebene 3 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Auslegung der Steuerelemente derart, dass die zur Erfüllung der Anforderungen von KTA 3101.2 und KTA 3103 hinsichtlich Abschaltung erforderliche Geometrie und Form der Steuerelemente, einschließlich der Menge, Geometrie- (Form und Lage) und Materialeigenschaften des Absorbermaterials eingehalten sind.

b) Auslegung der Steuerelemente derart, dass sie unter Berücksichtigung ihres Eigengewichts und der auftretenden Belastungen hinreichend schnell in den Reaktorkern, entsprechend den Anforderungen von KTA 3101.2 und KTA 3103, eingebracht werden können.

c) Auslegung der Steuerelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.

d) Auslegung der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebene 3, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 2-2 angegeben.

3.2.2.3 Sicherheitsebene 4a

(1) Die sicherheitstechnischen Anforderungen auf der Sicherheitsebene 4a (ATWS) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Die vor der Transiente im Kern befindlichen Steuerelemente müssen während und nach der Transiente wirksam bleiben (keine Umverlagerung des Absorbermaterials).

b) Beim SWR muss zusätzlich eine ausreichende Anzahl von Steuerelementen elektromotorisch eingefahren werden können.

H i n w e i s :
Für den DWR gelten beim ATWS hinsichtlich der Verfahrbarkeit der Steuerelemente keine Anforderungen.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

(3) Die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Sicherheitsebene 4a, einschließlich der Schutzziele, aus denen sie sich ableiten, sind im Anhang A, Tabelle A 2-3 angegeben.

3.2.3 Drosselkörper

(1) An die zur Vereinheitlichung der thermohydraulischen Bedingungen im Reaktorkern eingesetzten Drosselkörper ergeben sich folgende sicherheitstechnische Anforderungen:

a) Es sind die in KTA 3101.1 festgelegten Anforderungen an die Brennelementkühlung zu erfüllen.

b) Die Auslegung der Drosselkörper muss derart erfolgen, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.

(2) Rückwirkungen auf angrenzende Kernbauteile, RDB-Einbauten und andere Systeme der Anlage sind zulässig, solange deren sicherheitstechnische Anforderungen eingehalten werden.

4 Nachweiskriterien

4.1 Komponentenübergreifende Anforderungen

4.1.1 Auslegungsgrundsätze

(1) Die zur Erfüllung der Nachweisziele einzuhaltenden Nachweiskriterien leiten sich aus den sicherheitstechnischen Anforderungen ab und berücksichtigen die konkrete Ausführungsform der Komponente.

H i n w e i s :
Zur Ausführungsform gehören sämtliche sich aus der Fertigung ergebenden Produkteigenschaften.

(2) Die Nachweiskriterien müssen auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a sowie für EVI und EVA (Bemessungserdbeben) und Notstandsfälle (Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz) und über die gesamte Einsatzzeit die relevanten Einflüsse und bedeutsamen Effekte berücksichtigen, wie Beanspruchungen infolge externer und interner mechanischer, thermischer, chemischer und strahlungsbedingter Einwirkungen, Veränderung von Werkstoffeigenschaften, Veränderungen der Geometrie sowie die sich aus den Funktionsanforderungen ergebenden Randbedingungen.

(3) Für EVI, EVA sowie für Notstandsfälle, die im übergeordneten Regelwerk nicht in die Sicherheitsebenen eingeordnet sind, werden in dieser Regel die gleichen Nachweiskriterien wie auf Sicherheitsebene 3 verwendet.

(4) Belastungen und Einflüsse aus dem Transport, der Handhabung und der Lagerung sind zu berücksichtigen.

(5) Zur Sicherstellung der Anforderungen aus Abschnitt 3 sind in Abschnitt 4 für die betreffenden Bauteile geeignete Nachweiskriterien für alle relevanten Beanspruchungen festgelegt.

(6) Diese komponentenspezifischen Nachweiskriterien sind den Versagensgrenzen soweit vorgelagert, dass die Unsicherheiten aus der Bestimmung der Versagensgrenzen oder der Abgrenzung des versagensfreien Bereichs berücksichtigt sind.

(7) Der Erfahrungsrückfluss z. B. aus Betrieb oder Experimenten ist zu berücksichtigen.

(8) Die nachfolgend aufgeführten komponentenspezifischen Nachweiskriterien beziehen sich auf den gegenwärtigen Stand der konstruktiven Ausführung. Bei anderen Ausführungsformen sind die Nachweiskriterien analog zu Absatz (1) bis (7) zu ermitteln.

4.1.2 Verwendung geeigneter Werkstoffe

(1) Die verwendeten Werkstoffe müssen geeignet sein. Die Spezifikation und der Herstellungsprozess der verwendeten Werkstoffe sollen – im Rahmen der für jede relevante Eigenschaft üblichen Streuung – die Reproduzierbarkeit des Werkstoffverhaltens unter Betriebsbedingungen sicherstellen. Hierbei sind alle wesentlichen Einflüsse auf die Werkstoffe, z. B. chemische, mechanische, thermische und strahlungsbedingte, zu berücksichtigen.

H i n w e i s :
Die für die Kernbauteile eingesetzten Werkstoffe sind bei ihrem Einsatz im Reaktor chemischen, mechanischen, thermischen und strahlungsbedingten Einflüssen ausgesetzt. Des Weiteren sind Einflüsse aus der Herstellung, z. B. beim Verformen oder Schweißen und der Wärmebehandlung möglich. Ferner kann es Einflüsse auf die Duktilität der Werkstoffe z. B. durch Bestrahlung oder Wasserstoffaufnahme sowie bei Steuerelementen Einflüsse auf das Absorbermaterial durch Neutronenabsorption oder möglichen Kühlmittelkontakt geben.

(2) Die Werkstoffe sind unter Berücksichtigung der auftretenden Spannungen und der Umgebungsbedingungen so zu wählen, dass keine Funktionsbeeinträchtigung durch Spannungsrisskorrosion auftritt.

H i n w e i s e :
(1) Reproduzierbarkeit bedeutet, dass sich die eingesetzten Werkstoffe unter definierten Betriebsbedingungen so verhalten, dass sich die relevanten Eigenschaften innerhalb sicherheitstechnisch akzeptabler Bandbreiten bewegen.

(2) Funktionsbeeinträchtigungen können direkt an der betroffenen Komponente, aber auch an anderen Komponenten (z. B. im Falle der Ablösung größerer Teile von der Bruchfläche) entstehen.

(3) Die Werkstoffe sind so zu wählen, dass die Strahlenexposition unter anderem durch Begrenzung der Aktivierung so gering wie möglich gehalten wird (ALARA).

4.1.3 Kompatibilität

(1) Die konstruktive Ausführung der Kernbauteile muss zu den Komponenten des Kernbauteils, zu den anderen Kernbauteilen und den angrenzenden Komponenten und Systemen kompatibel sein.

(2) Die Konstruktion der Kernbauteile ist so vorzunehmen, dass die Wechselwirkung der Bestandteile eines Kernbauteils untereinander sowie des Kernbauteils mit anderen Kernbauteilen deren auf den jeweiligen Sicherheitsebenen erforderliche Funktionen und Eigenschaften nicht beeinträchtigt.

(3) Insbesondere dürfen die Wechselwirkungen der Brennelemente untereinander und mit anderen Kernbauteilen durch aufgebrachte statische oder dynamische Lasten und daraus resultierende Schwingungen oder Verformungen die Funktionen der Kernbauteile insgesamt nicht beeinträchtigen.

(4) Insbesondere sind folgende Kombinationen zu beachten:

a) Bestandteile eines Kernbauteils untereinander (z. B. ausreichender Freiraum zwischen Brennstab und BE-Struktur),

b) Kernbauteile mit angrenzenden Kernbauteilen wie

   ba) Brennelemente untereinander,

   bb) Brennelemente mit den Brennelementkästen und Brennelementkästen untereinander (SWR),

   bc) Brennelemente mit den Steuerelementen und Drosselkörpern (DWR),

   bd) Brennelementkästen mit den Steuerelementen (SWR),

   be) Brennelemente mit der Kerninstrumentierung und

c) Kernbauteile mit den Kraftwerkssystemen (z. B. RDB-Einbauten, Steuerelementantrieben, Handhabungs- und Lagereinrichtungen).

   H i n w e i s :

   Ein wesentlicher Aspekt der Kompatibilität der Kernbauteile ist die Begrenzung der Verformungen (z. B. der Brennelemente im DWR und Brennelementkästen im SWR), um Beschädigungen im Betrieb und bei der Handhabung zu vermeiden. Eine erhöhte Verformung der Brennelemente im DWR und der Brennelementkästen im SWR könnte die Verfahrbarkeit der Steuerelemente derart beeinträchtigen, dass die sicherheitstechnische Aufgabe des Abschaltsystems entsprechend KTA 3103 und KTA 3101.2 nicht erfüllt wird. Wesentliche Parameter bei der Ermittlung des Verformungsverhaltens der Kernbauteile (Brennelemente beim DWR und Brennelementkästen beim SWR) sind deren laterale Steifigkeit und das Kriechverhalten der eingesetzten Werkstoffe.

   Innerhalb des Reaktorkerns werden die Brennelemente in den RDB-Einbauten gelagert und geführt (bei SWR) bzw. verspannt (bei DWR). Neben der daraus vorauszusetzenden geometrischen Kompatibilität werden auch thermohydraulische und mechanische Kompatibilität bei wechselseitigen Belastungen berücksichtigt.

   Die zur Überwachung des Betriebs erforderlichen Instrumentierungslanzen werden innerhalb des Brennelements (bei DWR in den Führungsrohren) oder zwischen den Brennelementen im Kreuzungspunkt von vier Kernzellen (bei SWR) positioniert. In den Köpfen der DWR-Brennelemente, die keine Steuerelemente enthalten, werden üblicherweise Drosselkörper zur Vereinheitlichung der thermohydraulischen Bedingungen eingebracht. Für diese Kernbauteile werden dieselben Anforderungen an die Kompatibilität gestellt.

   Bei durch strahlungsinduziertem Wachstum oder Kriechen von Strukturteilen bedingten geometrischen Änderungen des Brennelements können einzelne Funktionen (z. B. Überdeckung der Fingerfedern durch den Brennelementkasten oder Verringerung von Strömungsquerschnitten in Wasserkanälen beim SWR) und die Kompatibilität des Brennelements (z. B. axiale Überdeckung der Abstandhalter benachbarter Brennelemente beim DWR, axiale und radiale Freiräume) beeinträchtigt werden.

(5) Die Verformung von Brennelementen ist so zu begrenzen, dass die Anforderungen aus KTA 3103 hinsichtlich der Steuerstabbewegung eingehalten werden.

(6) Die Verformung von Brennelementen darf nicht zu Beschädigungen der Brennelemente oder der angrenzenden Komponenten führen.

(7) Zum Nachweis der in (5) und (6) gestellten Forderungen ist das Verformungsverhalten der Brennelemente während des Betriebes im Rahmen der Auslegung zu bewerten. Dabei sind u. a. die relevanten konstruktiven und werkstoffspezifischen Eigenschaften (z. B. die Steifigkeit von Brennelement und Brennelement-Struktur und das Kriechverhalten der Brennelement-Struktur) und relevante Einsatzrandbedingungen (z. B. Brennelemente auf benachbarten Kernpositionen) zu berücksichtigen.

H i n w e i s :

Die Erfüllung der in (5) und (6) gestellten Forderungen kann z. B. bei Designänderungen durch eine Relativbewertung des Verformungsverhaltens der Brennelemente eines neuen Designs gegenüber einem betriebsbewährten Design gezeigt werden.

(8) Die Kompatibilität der Brennelemente mit den Handhabungs- und Lagerungseinrichtungen muss auch unter Berücksichtigung betriebsbedingter Verformungen gewährleistet sein.

(9) Anforderungen an die thermohydraulische Kompatibilität sind in KTA 3101.1 enthalten.

(10) Die Werkstoffe müssen unter Berücksichtigung elektrochemischer Wechselwirkungen mit denen der angrenzenden Komponenten kompatibel sein.

4.1.4 Inspizierbarkeit

(1) Die Kernbauteile sollen so gestaltet sein, dass sie auch im bestrahlten Zustand inspizierbar sind. Dies schließt eine Inspektion mit ferngesteuerten Geräten ein.

(2) Sofern zu erwarten ist, dass Schraubverbindungen wieder gelöst werden müssen, sind geeignete konstruktive Ausführungen zur Vermeidung eines Festsetzens des Gewinde- oder Schraubensystems vorzusehen.

H i n w e i s :

Geeignete Ausführungen sind z. B. gerollte Gewinde oder Gewindeausführungen mit zusätzlichem Spitzen- und Flankenspiel sowie mit gerundeten Kanten.

4.1.5 Vermeidung loser Teile

(1) Kernbauteile und Verbindungen (z. B. Schraubverbindungen) sind so auszuführen, dass lose Teile im Reaktor sicher vermieden werden (z. B. durch gesicherte Schraubverbindungen).

4.2 Brennelementstruktur, einschließlich Brennelementkasten beim SWR

4.2.1 Allgemeines

(1) Die im Folgenden beschriebenen komponentenspezifischen Nachweiskriterien gelten unabhängig vom Anlagentyp (DWR/SWR). Die für den im SWR eingesetzten Brennelementkasten zutreffenden Nachweiskriterien sind hervorgehoben.

(2) Auslegungsaspekte für Brennstäbe, die aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Brennelementstrukturteilen und den Brennstäben eine integrale Nachweisführung erfordern, werden in diesem Abschnitt 4.2 mit behandelt.

4.2.2 Nachweiskriterien für die Brennelementstruktur auf den Sicherheitsebenen 1 und 2

4.2.2.1 Begrenzung von Spannungen und Dehnungen

(1) Die Spannungen in den Brennelement-Strukturteilen, den Brennelementkästen und den Verbindungen (z. B. Schraubverbindungen, Schweißverbindungen, Lötverbindungen, formschlüssige Verbindungen) sind zu begrenzen.

Hinweis:

Die Brennelement-Strukturteile und die Verbindungen werden bei der Handhabung durch die wirkenden Eigengewichts- und Trägheitskräfte belastet.

Beim Einsatz der Brennelemente im Reaktor (Betrieb) sind die Strukturteile und Verbindungen Kräften aus Eigengewicht, hydrostatischem Auftrieb und Strömungskräften ausgesetzt. Beim DWR treten zusätzlich Niederhaltekräfte auf. Diese Kräfte führen zu Zug-, Druck- und Biegebeanspruchungen.

Weiterhin entstehen durch differentielle thermische Dehnung und differentielles strahleninduziertes Wachstum zwischen den Strukturteilen untereinander und zwischen Strukturteilen und Brennstäben Kräfte.

Die Einspannbedingungen der Druckfedern ändern sich infolge thermischen und strahleninduzierten Wachstums bei den unterschiedlichen Betriebsbedingungen und im Verlauf der Einsatzzeit des Brennelementes. Weiterhin tritt eine Relaxation der Federkraft z. B. infolge der Neutronenbestrahlung auf.

(2) Dabei dürfen materialspezifische Grenzen nicht überschritten werden für:

a) die Vergleichsspannungen in den Brennelement-Strukturteilen, Brennelementkästen und Verbindungen,

b) die Scherspannungen in Verbindungen,

c) die Flächenpressung bei Schraubverbindungen zwischen Kopf bzw. Mutter und Auflagefläche und

d) die Schubspannungen in den Druckfedern.

(3) Der Einfluss von im Reaktoreinsatz entstehenden Geometrieänderungen (z. B. Kriechverformungen) auf die im Bauteil auftretenden Spannungen ist zu bewerten und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

(4) Wenn aus Funktions- und Kompatibilitätsgründen spezifizierte Verformungsgrenzen eingehalten werden müssen, ist eine Verformungsanalyse durchzuführen.

(5) Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.2.2.2 Geometrische Stabilität

(1) Die Strukturteile sowie die Brennstäbe dürfen unter axialen Druckbeanspruchungen nicht knicken. Deshalb müssen Druckkräfte so begrenzt oder das Bauteil so ausgelegt werden, dass diese instabilen Zustände nicht auftreten.

(2) Bei der Nachweisführung sind geometrische und strukturelle Imperfektionen im Sinne der DIN EN 1993-1-1 zu berücksichtigen. Geometrieänderungen aus dem Reaktorbetrieb sind zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen.

Hinweis:

Der Anhang B zeigt mögliche Nachweiswege zur Berücksichtigung von Imperfektionen und Geometrieänderungen auf.

(3) Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.2.2.3 Ermüdung

(1) Zyklisch wechselnde thermische oder mechanische Belastungen können auch unterhalb der statischen mechanischen Festigkeit des Materials zu einem voranschreitenden Schädigungsprozess im Werkstoff führen. Die Beanspruchungen in den Brennelement-Strukturteilen und Brennelementkästen sind so zu begrenzen, dass kein Versagen in Folge von Ermüdung auftritt.

Hinweis:

Durch Änderungen des Betriebszustandes (z. B. beim An- und Abfahren bzw. Leistungsänderung) und infolge strömungsinduzierter Schwingungen werden die Brennelement-Strukturteile und Schraubenverbindungen Wechselspannungen ausgesetzt, die zur Ermüdung beitragen können.

Im Normalbetrieb ergeben sich zyklisch wechselnde Belastungen z. B. aus

- den fluid-induzierten Schwingungsanregungen der Brennelemente,
- Belastungen aus dem Lastfolgebetrieb und

Belastungen bei Zyklierfahrweise des Reaktors (z. B. Tag/Nacht-Zyklen, Wochenendzyklen).
Aufgrund der geringen Belastungen bei hochzyklischen Vorgängen oder den geringen Lastspielzahlen bei höheren Belastungen und unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung ist ein Mediumseinfluss auf die Ermüdung bei diesen Komponenten nicht zu erwarten.

(2) Bei Nachweisen entsprechend (1) sind die im Anhang B 2.4 angegebenen Vorgehensweisen und Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.2.2.4 Begrenzung der Korrosion

(1) Die Korrosion ist so zu begrenzen, dass eine ausreichende Dicke der metallischen Struktur zur Abtragung der mechanischen Belastungen vorhanden ist.

4.2.2.5 Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität

(1) Es ist sicherzustellen, dass die eingesetzten Werkstoffe eine ausreichende Duktilität aufweisen. Dabei sind betriebsbedingte Effekte, wie Neutronenversprödung oder Versprödung durch Wasserstoffaufnahme, sowie deren Beeinflussung durch den Spannungszustand (siehe B 2.3 und B 2.5) werkstoffspezifisch zu berücksichtigen.

(2) Die Wasserstoffaufnahme ist auf werkstoffspezifische Werte zu begrenzen.

Hinweis:

Ein Teil des bei Korrosion entstehenden Wasserstoffs wird von den Strukturteilen aufgenommen. Zu große Wasserstoffgehalte führen zu einer Duktilitätsminderung.

4.2.2.6 Sicherstellung der Lage des Brennstoffs

(1) Die axiale und radiale Position der Brennstäbe im Brennelement und der Brennelemente im Kern ist zu gewährleisten.

(2) Für DWR-Brennelemente ist auf Sicherheitsebene 1 nachzuweisen, dass die Resultierende aller axial auf das Brennelement wirkenden Kräfte eine Kontaktkraft auf die Abstellplatten des unteren Rosts bewirkt. Bei Transienten der Sicherheitsebene 2 soll ein Abheben von Brennelementen vom unteren Rost nicht eintreten. Ein kurzzeitiges Abheben auf der Sicherheitsebene 2 ist zulässig, wenn nachgewiesen wird, dass

a) keine unzulässigen Belastungen an Brennelementen, den anderen Kernbauteilen und den RDB-Einbauten entstehen,

b) während des Abhebens die Kompatibilität mit den angrenzenden Brennelementen, den anderen Kernbauteilen und RDB-Einbauten erhalten bleibt und

c) kein Brennelement (Brennelement-Fuß) den zylindrischen Teil des Zentrierstiftes des unteren Rosts verlässt und jedes Brennelement in seine ursprüngliche Position zurückkehrt.

(3) Für SWR-Brennelemente ist nachzuweisen, dass die Resultierende aller axial auf das Brennelement (sofern vorhanden auch für Brennstabbündel oder Teilbündel) wirkenden Kräfte eine Kontaktkraft auf die jeweilige Aufstandsfläche bewirkt.

(4) Die Lagerung der Brennstäbe im Brennelement ist so auszulegen, dass sie unter den auftretenden Belastungen (z. B. Eigengewicht, Strömungskräfte, Schwingung) hinsichtlich ihrer axialen und radialen Position soweit gehalten werden, dass die Randbedingungen für die neutronenphysikalische und thermohydraulische Auslegung erfüllt werden und Längenänderungen relativ zur Brennelement-Struktur ausgeglichen werden können.

4.2.2.7 Brennstablagerung

(1) Die Lagerung der Brennstäbe im Brennelement ist so auszulegen, dass keine Schwächung der Hüllrohrwand (z. B. durch Reibabtrag zwischen Brennstab und Abstandhalter) derart eintritt, dass die Anforderungen zur Gewährleistung der Dichtheit des Brennstabs nicht mehr erfüllt werden.

Hinweis:

Die Brennstäbe werden durch die Abstandhalter in der für den Einsatz optimierten Geometrie innerhalb der Brennelementstruktur gehalten. Um differentielles thermisches und neutroneninduziertes Wachstum zwischen Brennelementstruktur und Brennstab ohne Überschreitung zulässiger Spannungen gewährleisten zu können, erfolgt die Lagerung der Brennstäbe im Abstandhalter üblicherweise mittels Federelementen. Durch die Wechselwirkung zwischen Brennstab und Abstandhalterzelle kann infolge Schwingung Materialabtrag (Fretting) auftreten.

Der Nachweis gemäß (1) kann z. B. so geführt werden, dass gezeigt wird, dass bis zum Einsatzende eine ausreichende Restfederkraft der Federelemente des Abstandhalters vorhanden ist. Es ist aber auch möglich, anhand experimenteller Nachweise zu zeigen, dass selbst bei im Verlauf der Einsatzzeit auftretenden Spalten zwischen Brennstab und Abstandhalter Fretting zu keiner unzulässigen Hüllrohrwandschwächung gemäß (1) führt.

4.2.2.8 DWR-spezifische Anforderungen

(1) Für DWR-Brennelemente ist nachzuweisen, dass beim Einfall der Steuerelemente keine unzulässigen Beanspruchungen der Brennelementstruktur auftreten. Die Belastungen sind im Rahmen der Spannungsberechnung zu berücksichtigen.

Hinweis:

Dies ist gezeigt, wenn die kinetische Energie des Steuerelementes beim Auftreffen auf den Brennelement-Kopf durch die Feder unter der Spinne des Steuerelementes aufgenommen wird, ohne dass es zu einem harten Kontakt zwischen Brennelement-Kopf und dem Steuerelement-Bolzen kommt und die Brennelementstruktur die maximale Federkraft während des Einfallvorgangs abtragen kann.

4.2.3 Nachweiskriterien für die Brennelementstruktur auf den Sicherheitsebenen 3 und 4a

4.2.3.1 Begrenzung von Verformungen

(1) Die bleibenden Verformungen der Abstandhalter und Führungsrohre (DWR) und der Brennelementkästen (SWR) sind so zu begrenzen, dass die Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit des Reaktors gewährleistet bleiben. Mögliche Vorverformungen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb sind zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen.

Hinweise:

(1) Für Kühlmittelverluststörfälle ist gemäß SiAnf beim DWR ein Leckquerschnitt von 0,1 F und beim SWR ein Leckquerschnitt von 2 F als Belastungsannahme anzusetzen.

(2) Eine bleibende Verformung von Führungsrohren und Abstandhaltern kann durch plastische Verformung (Überschreiten der Fließgrenze) oder durch Stabilitätsversagen hervorgerufen werden. Abhängig von der Konstruktion und den Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe ist einer der beiden Mechanismen auslegungsbestimmend.

4.2.3.2 Begrenzung von Spannungen

(1) Auf der Sicherheitsebene 3 sind die primären Spannungen in den Brennelement-Strukturteilen, den Brennstäben, den Brennelementkästen und den Verbindungen (z. B. Schraubverbindungen, Schweißverbindungen, Lötverbindungen, formschlüssige Verbindungen) zu begrenzen.

(2) Dabei dürfen materialspezifische Grenzen nicht überschritten werden für:

a) die Vergleichsspannungen in den Brennelement-Strukturteilen, Brennstäben, Brennelementkästen und Verbindungen und

b) die Scherspannungen in Gewinden.

(3) Der Einfluss von Vorverformungen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb (z. B. Kriechverformungen) auf die im Bauteil auftretenden Spannungen ist zu bewerten und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

(4) Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.2.4 Komponentenspezifische Anforderungen für Transport, Handhabung und Lagerung

(1) Die Kompatibilität der Brennelemente und der Brennelementkästen (SWR) mit den Transport-, Handhabungs- und Lagerungseinrichtungen muss gegeben sein.

(2) Die im Zuge der Herstellung nachgewiesene Qualität der Brennelemente und der Brennelementkästen darf durch die während Transport, Handhabung und Lagerung auftretenden Belastungen nicht in einer Form beeinträchtigt werden, welche zu Einschränkungen beim weiteren Einsatz führen.

(3) Hierzu ist nachzuweisen, dass

a) die bei Transport, Handhabung und Lagerung auftretenden Spannungen und Dehnungen auf werkstoffspezifisch zulässige Werte begrenzt werden. Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B für die Sicherheitsebenen 1 und 2 angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

b) sich die Pelletsäule im Brennstab nicht verschiebt,

c) sich die Brennstäbe im Brennelement weder einzeln noch als Bündel axial verschieben,

d) die Federelemente infolge der Massenwirkung der Brennstäbe keine Belastung erfahren, die nach dem Transport ein Unterschreiten der minimal spezifizierten Federkraft bewirken,

e) es infolge der Massenwirkung der Brennstäbe zu keiner Schädigung am Abstandhalter kommen kann, d.h. die Transportbelastungen müssen stets unterhalb der Abstandhalter-Belastbarkeit liegen,

f) Oberflächenbeschädigungen (Fretting) an den Brennelementkomponenten z. B. an den BrennstabhüIlrohren infolge der Relativbewegung zwischen Brennstäben und Abstandhalter-Lagerpunkten auf die in den Herstellungsunterlagen festgelegten Werte begrenzt werden.

(4) Bei MOX-Brennelementen sind die Folgewirkungen der Wärmeleistung beim Transport und beim Einbringen in das Nasslager zu berücksichtigen.

(5) Die Nachweise dürfen über Rechnungen oder über die Qualifikation der Transporte erbracht werden.

4.3 Brennstab

4.3.1 Allgemeines

(1) Die im Folgenden beschriebenen komponentenspezifischen Nachweiskriterien gelten unabhängig vom Anlagentyp (DWR/SWR).

(2) Auslegungsaspekte für Brennstäbe, die aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Brennelementstrukturteilen und den Brennstäben eine integrale Nachweisführung erfordern, werden in Abschnitt 4.2 mit behandelt.

4.3.2 Nachweiskriterien für den Brennstab auf den Sicherheitsebenen 1 und 2

4.3.2.1 Begrenzung von Spannungen und Dehnungen im Hüllrohr

(1) Grundsätzlich sind Spannungen auf werkstoffspezifisch zulässige Werte zu begrenzen. Dabei sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen. Ausnahmen sind gemäß (3) zulässig.

Hinweis:

Spannungsbeanspruchungen entstehen z. B. durch die Druckdifferenz zwischen Kühlmitteldruck und Brennstabinnendruck im Hüllrohr sowie thermische Belastungen oder Biegebelastungen.

Bei schnellen Erhöhungen der Brennstableistung werden die Beanspruchungen nicht über das Spannungskriterium, sondern das Dehnungskriterium gemäß 4.3.2.1 (3) begrenzt.

(2) Zu den gemäß 4.1.1 (2) werkstoffspezifisch zu berücksichtigenden betriebsbedingten Effekten gehören u. a. Wanddickenschwächung durch Korrosion und strahlungsbedingte Verfestigung.

(3) Bei schnellen Erhöhungen der Brennstableistung aufgrund von Ereignissen der Sicherheitsebene 2, bei denen kein Spannungsabbau durch Relaxationsvorgänge stattfindet, ist ein Überschreiten der Elastizitätsgrenze zulässig, es ist jedoch die tangentiale Gesamtdehnung des Hüllrohrs (elastisch und plastisch) zu begrenzen.

(4) Bei Dehnungen mit einer geringen Dehnungsänderungsgeschwindigkeit und auf niedrigem Spannungsniveau unterhalb der Fließgrenze (z. B. in Folge von Langzeiteffekten) ist die plastische Vergleichsdehnung des Hüllrohrs im Zugbereich zu begrenzen.

Hinweis zu (3) und (4):

Zu Beginn des Einsatzes im Reaktor ergibt sich in einem Brennstab bei Nennleistung des Reaktors unter Berücksichtigung der elastischen Stauchung des Hüllrohrs durch den Kühlmitteldruck und der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Hüllrohr und Brennstoff ein Betriebsspiel im warmen Zustand. Das Hüllrohr steht infolge der Differenz zwischen dem Kühlmitteldruck und dem Innendruck des Brennstabs unter Druckspannung und kriecht auf den Brennstoff auf. Nach dem Aufliegen des Hüllrohrs auf dem Brennstoff wird es durch das Brennstoffschwellen langsam gedehnt, wobei das Hüllrohr bei sehr hohem Abbrand bis über den Anfangsdurchmesser hinaus gedehnt werden kann.

Daneben kann es auch durch schnelle Leistungserhöhungen zu einer Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hüllrohr kommen.

Hinsichtlich der Auslegung der Brennstäbe wird die Wechselwirkung in folgender Weise unterteilt:

a) Schnelle Erhöhungen der Brennstableistung (siehe (3)):

Bei schnellen Erhöhungen der Brennstableistung kann es aufgrund der Brennstoff-Wärmedehnung in Abhängigkeit vom Abbrandzustand und der Größe der Leistungserhöhung bzw. der erreichten Endleistung zu einer Dehnung des Hüllrohrs kommen. Für diesen Fall ist die durch die schnelle Leistungserhöhung auftretende tangentiale Gesamtdehnung (elastisch und plastisch) relevant.

b) Langzeitwechselwirkung durch Brennstoffschwellen (siehe (4)):

Nach dem Aufkriechen des Hüllrohrs auf den Brennstoff kriecht das Hüllrohr mit einer geringen Dehnrate und aufgrund der stattfindenden Spannungsrelaxation bei niedrigem Spannungsniveau. Für diesen Fall ist die Kriechduktilität relevant.

4.3.2.2 Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität

(1) Es ist sicherzustellen, dass der Hüllrohrwerkstoff eine ausreichende Duktilität aufweist. Dabei sind betriebsbedingte Effekte, wie Neutronenversprödung, Versprödung durch Wasserstoffaufnahme, Hydridausrichtung sowie deren Beeinflussung durch den Spannungszustand werkstoffspezifisch zu berücksichtigen.

Hinweis:

Der Nachweis kann beispielsweise über die für den Werkstoff erreichbare plastische Dehnung experimentell erbracht werden.

(2) Die Wasserstoffaufnahme ist werkstoffspezifisch zu begrenzen.

Hinweis:

Ein Teil des bei Korrosion entstehenden Wasserstoffs wird von den Hüllrohren aufgenommen. Zu große Wasserstoffgehalte führen zu einer Duktilitätsminderung.

4.3.2.3 Geometrische Stabilität

(1) Elastisches Beulen und plastische Verformungen unter äußerem Überdruck sind auszuschließen. Dies gilt nicht für Kriechvorgänge mit einer geringen Dehnungsänderungsgeschwindigkeit und auf niedrigem Spannungsniveau entsprechend 4.3.2.1 (4).

Hinweis:

Die Hüllrohre der Brennstäbe stehen im Allgemeinen durch die Druckdifferenz zwischen dem Kühlmitteldruck und dem Innendruck der Stäbe unter einem äußeren Überdruck. Ein unter äußerem Überdruck stehendes Hüllrohr kann elastisch beulen oder, wenn die Spannungen die Streckgrenze überschreiten, eine plastische Verformung erleiden.

(2) Bei Nachweisen entsprechend (1) sind die im Anhang B angegebenen Vorgehensweisen und Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.3.2.4 Ermüdung

(1) Zyklisch wechselnde thermische oder mechanische Belastungen können auch unterhalb der statischen mechanischen Festigkeit des Materials zu einem voranschreitenden Schädigungsprozess im Werkstoff führen. Die Beanspruchungen im Hüllrohr sind so zu begrenzen, dass kein Hüllrohrversagen in Folge von Ermüdung auftritt.

(2) Bei Nachweisen entsprechend (1) sind die im Anhang B 2.4 angegebenen Vorgehensweisen und Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Hinweis:

Im Normalbetrieb ergeben sich zyklisch wechselnde Belastungen z. B. aus

- den fluid-induzierten Schwingungsanregungen der Brennstäbe
- dem Lastfolgebetrieb,
- Zyklierfahrweise des Reaktors (z. B. Tag/Nacht-Zyklen, Wochenendzyklen)

Aufgrund der geringen Belastungen bei hochzyklischen Vorgängen oder den geringen Lastspielzahlen bei höheren Belastungen und unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung ist ein Mediumseinfluss auf die Ermüdung bei diesen Komponenten nicht zu erwarten.

4.3.2.5 Begrenzung von Beanspruchungen durch chemisch mechanische Wechselwirkung (PCI) und Spannungsrisskorrosion (SCC)

(1) Leistungserhöhungen können abhängig von

a) ihrer Leistungsänderungsgeschwindigkeit,

b) Sprunghöhe und Endleistung,

c) Haltezeit der Endleistung und

d) Konditionierungszustand vor der Leistungserhöhung

zu einer chemisch-mechanischen Wechselwirkung führen (bekannt auch unter dem Begriff PCI/SCC – pellet clad interaction / stress corrosion cracking). Die hieraus resultierenden Beanspruchungen sind so zu begrenzen, dass die Dichtheit des Brennstabs gewährleistet ist.

(2) Entsprechende Kriterien sind unter zuhilfenahme von experimentellen Ergebnissen (z. B. Rampentests in Testreaktoren; Betriebserfahrungen) abzuleiten.

Hinweis:

Bei der Ableitung der Kriterien können empirische oder analytische Methoden verwendet werden.

(3) Der Nachweis der Einhaltung der Kriterien darf auf Sicherheitsebene 1 unter Zugrundelegung von Regelungen zur Reaktorfahrweise sowie auf Sicherheitsebene 1 und 2 unter Berücksichtigung der Einrichtungen zur Leistungs- und Leistungsdichtebegrenzung erfolgen.

4.3.2.6 Begrenzung der Korrosion

(1) Die Korrosion ist so zu begrenzen, dass

a) die Temperatur an der Grenzfläche Metall/Metalloxid in einem Bereich bleibt, bei dem ein unkontrollierter Anstieg der Korrosionsrate vermieden wird und

b) eine ausreichende Dicke der metallischen Hüllrohrwand zur Abtragung der mechanischen Belastungen vorhanden ist.

Hinweis:

Unter Betriebsbedingungen kann es zu einer Reaktion des Brennstab-Hüllrohrmaterials mit der umgebenden Wasser- bzw. Wasser/Dampf-Atmosphäre unter Bildung einer Oxidschicht auf der Hüllrohraußenseite kommen (Hüllrohrkorrosion). Dies kann zur Beeinflussung der Temperaturverhältnisse des Systems Brennstab (Verschlechterung der Wärmeübertragung vom Brennstoff über die Hülle an das Kühlmittel) und zu einer Wanddickenreduktion führen. Zur Vermeidung einer unkontrollierten Temperaturzunahme (und damit verbundener Erhöhung der Korrosionsrate) wird die Korrosion begrenzt (z. B. durch Begrenzung der Oxidschichtdicke). Die mit der Korrosion einhergehende Wanddickenreduktion wird in 4.3.2.1 berücksichtigt. Mit der Hüllrohrkorrosion verbunden ist die Erzeugung von Wasserstoff, der z. T. vom Hüllrohr aufgenommen wird. Durch die Begrenzung der Korrosion selbst wird auch der Wasserstoffgehalt im Hüllrohr begrenzt (siehe auch 4.3.2.2).

Bei der Korrosion unterscheidet man verschiedene Formen, z. B. uniforme und nodulare Korrosion sowie Schattenkorrosion. Eine Behandlung ihrer Auswirkungen kann fallspezifisch erfolgen.

4.3.2.7 Begrenzung des Innendrucks

(1) Der Innendruck-Aufbau durch Spaltgasfreisetzung im Brennstab ist so zu begrenzen, dass es zu keiner sich selbst verstärkenden thermischen Rückkopplung kommt.

Hinweis:

Die durch den Kühlmitteldruck im Hüllrohr bewirkten Druckspannungen werden zum Teil durch den Brennstab-Innendruck kompensiert. Zum Anfang der Einsatzzeit stellt sich der Innendruck aus der Helium-Füllung aus der Fertigung und den Temperatur- und Volumenverhältnissen im Stabinneren ein. Im Verlauf des Abbrandes entstehen im Brennstoff u. a. gasförmige Spaltprodukte, von denen ein Teil (abhängig von der Einsatzgeschichte des jeweiligen Brennstabs) in die Freivolumina des Brennstabs freigesetzt wird und damit eine Erhöhung des Brennstab-Innendrucks bewirkt. Mit Erfüllung des Nachweiskriteriums gemäß (1) wird sichergestellt, dass auch bei innerem Überdruck die thermische Stabilität des Systems Brennstab gewährleistet bleibt: Ein unter innerem Überdruck mögliches Kriechen des Hüllrohrs nach außen könnte zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs führen mit der Folge eines Anstiegs der Brennstofftemperatur und damit einer Erhöhung der Spaltgasfreisetzung, wodurch der Innendruck nochmals ansteigen würde (thermische Rückkopplung).

Bisher etablierte Nachweismethoden sind z. B. eine geeignete Begrenzung des Innendrucks, die Begrenzung der Hüllrohrdehnungsgeschwindigkeit auf Grundlage von Experimenten (ROPE) oder der Nachweis über Vergleich der rechnerischen Brennstoffschwellrate mit der Hüllrohrdehnrate.

4.3.2.8 Begrenzung der Brennstofftemperatur

(1) Die maximale Temperatur im Brennstoff muss unter der Schmelztemperatur bleiben.

(2) Bei diesem Nachweis sind die ungünstigsten Betriebsbedingungen der Sicherheitsebene 2 einschließlich der maximal möglichen Überlast an der Stelle der höchsten Leistungserzeugung des Brennstoffs zu unterstellen.

Hinweis:

Damit werden Verlagerungen von geschmolzenem Brennstoff im Innern der Brennstäbe sicher ausgeschlossen. Außerdem wird durch diese Festlegung u. a. vermieden, dass durch die mit dem Aufschmelzen verbundene Volumenzunahme des Brennstoffes eine zusätzliche Hüllrohrdehnung auftritt.

Die Schmelztemperatur ist u. a. abhängig von der Brennstoffzusammensetzung (z. B. UO_2 oder MOX, Additive wie Gadolinium) und vom Abbrand.

4.3.3 Nachweiskriterien für den Brennstab auf der Sicherheitsebene 3

4.3.3.1 Begrenzung der Deformationen der Brennstabhüllrohre

(1) Die Hüllrohrdehnung der Brennstäbe ist so zu begrenzen, dass der Erhalt einer freien Strömungsfläche zur ausreichenden Kühlung der Brennstäbe sichergestellt ist.

Hinweis:

Die ausreichenden freien Strömungsflächen können in Versuchen ermittelt werden (z. B. REBEKA-Versuche, siehe Wiehr [4]).

4.3.3.2 Dichtheit des Brennstabs

(1) Grundsätzlich ist die Dichtheit des Brennstabs zu gewährleisten.

(2) Abweichend davon gelten im Fall von Kühlmittelverluststörfällen die in 4.3.3.4 (4) sowie bei Reaktivitätsstörfällen die in 4.3.3.5 genannten Anforderungen.

Hinweis:

Anforderungen im Hinblick auf kritische Siedezustände sind in KTA 3101.1 geregelt.

4.3.3.3 Begrenzung der Brennstofftemperatur

(1) Die maximale Temperatur im Brennstoff muss grundsätzlich unter der Schmelztemperatur bleiben. Partielles Brennstoffschmelzen ist zulässig, sofern die Rückhaltefunktion der Brennstabhüllrohre nicht beeinträchtigt wird und großflächige Umlagerungen des Brennstoffs ausgeschlossen sind.

4.3.3.4 Spezifische Anforderungen bei Kühlmittelverluststörfällen

(1) Eine maximale Hüllrohrtemperatur von 1200 °C ist einzuhalten.

Hinweis:

Durch die Einhaltung einer maximalen Hüllrohrtemperatur von 1200 °C wird eine selbsterhaltende exotherme Zirkonium-Wasser-Reaktion verhindert und einer übermäßigen Versprödung des Hüllrohrs entgegengewirkt.

(2) Zur Begrenzung der erzeugten Wasserstoffmenge ist sicherzustellen, dass nicht mehr als 1 % des im Reaktorkern enthaltenen Zirkoniums oxidiert.

(3) Für alle Brennstäbe ist nachzuweisen, dass bei der Hüllrohrwiederbenetzung (Quenchen) eine ausreichende Restduktilität (z. B. über ein geeignetes Kriterium zur Begrenzung der

Hüllrohroxidationstiefe) oder eine ausreichende Restfestigkeit vorhanden ist, so dass eine Fragmentierung des Hüllrohrs in Folge des Ereignisablaufs nicht eintritt.

Hinweis:

Die Feststellung der Restduktilität basiert auf der Messung der Verformbarkeit von Proben nach Hochtemperaturoxidation, z. B. in Ring-Drucktests. Der Übergang zum rein spröden Verhalten der Probe ist durch das Zusammentreffen von Zugfestigkeit und Streckgrenze definiert (zero-ductility), siehe z. B. CSNI Technical Opinion papers No. 13 [5].

(4) Bei Kühlmittelverluststörfällen mit Leckquerschnitten größer als 0,1 F ist die Anzahl der geborstenen Brennstäbe auf 10 % aller Stäbe im Kern zu begrenzen. Bei Kühlmittelverluststörfällen mit Leckquerschnitten kleiner oder gleich 0,1 F ist die Anzahl der geborstenen Brennstäbe auf 1 % aller Stäbe im Kern zu begrenzen.

(5) Im Falle von Hüllrohrschäden sind zusätzlich Folgen des Berstens zu berücksichtigen:

a) Unter Berücksichtigung einer möglichen lokalen Duktilitätsminderung im Bereich der Berststelle durch Wasserstoffaufnahme auf der Hüllrohrinnenseite ist nachzuweisen, dass die Anforderung gemäß (3) eingehalten wird.

b) Ein möglicher Brennstoffaustrag, insbesondere bei Hochabbrand ist so zu begrenzen, dass die Kritikalitätssicherheit und Kühlbarkeit sichergestellt und das radiologische Sicherheitsziel eingehalten wird.

Hinweis:

Bei Brennstäben mit höheren Abbränden ist beim Bersten mit vermehrtem Brennstoffaustrag zu rechnen (siehe z. B. [6]).

In der Regel sind die bei den bestehenden radiologischen Nachweisen getroffenen Annahmen limitierend hinsichtlich der maximal zulässigen insgesamt freigesetzten Brennstoffmenge.

Sofern die Gesamtmenge auf 0,1 % der Feststoffe der defekten Brennstäbe (der angenommene Schadensumfang ist 10 % des Kerninventars) begrenzt wird, kann davon ausgegangen werden, dass bei Einhaltung dieser Obergrenze für freigesetzten Brennstoff im Kern die Kritikalitätssicherheit und die Kühlbarkeit des Kerns gewährleistet sind.

4.3.3.5 Spezifische Anforderungen bei Reaktivitätsstörfällen

(1) Bei schnellen Reaktivitätsänderungen (RIA) ist sicherzustellen, dass der Brennstoff innerhalb des Hüllrohrs verbleibt.

Hinweis:

Ein vorgelagertes Nachweiskriterium hierzu ist die Dichtheit des Brennstabs. Diese ist sichergestellt, wenn die maximale Enthalpiefreisetzung im Brennstoff (radial über den Pelletquerschnitt gemittelt) unterhalb einer werkstoffzustands- oder abbrandabhängigen Hüllrohr-Defektgrenze bleibt.

4.3.4 Nachweiskriterien für den Brennstab auf der Sicherheitsebene 4a

(1) Es ist zu zeigen dass

a) eine maximale Hüllrohrtemperatur von 1200 °C eingehalten wird und

b) bei der Hüllrohrwiederbenetzung (Quenchen) eine Restduktilität (z. B. über ein geeignetes Kriterium zur Begrenzung der Hüllrohroxidationstiefe) oder eine ausreichende Restfestigkeit vorhanden ist, so dass eine Fragmentierung des Hüllrohrs in Folge des Ereignisablaufs nicht eintritt.

Hinweis:

Die Kühlbarkeit des Reaktorkerns beim ATWS ist gegeben, wenn gezeigt werden kann, dass keine Brennstabschäden auftreten, die zu einer Blockade der Kühlkanäle führen.

Die Kühlbarkeit kann durch Ausschluss der Fragmentierung der Hüllrohre sichergestellt werden. Dies ist gewährleistet wenn vergleichbar der Vorgehensweise beim KMV eine Hüllrohrtemperatur von maximal 1200 °C eingehalten wird und eine Restduktilität oder ausreichende Restfestigkeit des Hüllrohrs vorhanden ist.

Beim ATWS treten keine so hohen Druckdifferenzen über die Hüllrohrwand auf, als dass Beulen oder Bersten zu befürchten ist.

(2) Vorgelagert zu den Kriterien (1) a) und b) ist die Kühlbarkeit gewährleistet, wenn nachgewiesen wird, dass keine kritischen Siedezustände gemäß KTA 3101.1 auftreten.

(3) Die Anforderung an die langfristige Unterkritikalität ist dadurch erfüllt, dass eine Fragmentierung des Brennstabhüllrohrs entsprechend (1) nicht eintritt.

Hinweis:

Beim ATWS ist die langfristige Unterkritikalität des Reaktorkerns gewährleistet, wenn die Geometrie des Kerns nach einem ATWS-Ereignis es zulässt, dass die im Laufe des Ereignisses in den Kern eingebrachten Neutronenabsorber (Steuerelemente beim SWR, Bor beim DWR) auch lokal hinreichend wirksam sind.

4.4 Steuerelemente

4.4.1 Allgemeines

(1) Die im Folgenden beschriebenen komponentenspezifischen Nachweiskriterien gelten unabhängig vom Anlagentyp (DWR/SWR).

Hinweis:

Typischerweise sind die Steuerelemente mit ihren Antrieben (beim DWR außen am RDB-Deckel und beim SWR außen an der RDB-Kalotte) mittels Antriebsstangen (DWR) oder Hohlkolben (SWR) verbunden. Beim DWR werden die Absorberstäbe der Steuerelemente in den Führungsrohren der Brennelemente und beim SWR die absorberführenden Teile der Steuerelemente (kreuzförmig angeordnete Steuerelementblätter) jeweils zwischen den vier Brennelementen einer Kernzelle bewegt.

(2) Die Konstruktion der Steuerelemente ist so vorzunehmen, dass die sicherheitstechnische Aufgabe des Abschaltsystems, deren Bestandteil sie sind, entsprechend KTA 3103 und KTA 3101.2 erfüllt wird.

(3) Die Konstruktion muss so erfolgen, dass mittels der Steuerelemente Absorbermaterial kontrolliert im erforderlichen Umfang in den Reaktorkern eingebracht werden kann.

(4) Dabei sind die neutronenabsorbierende Wirkung des Absorbermaterials und dessen Verteilung in den Steuerelementen sowie die erforderlichen Zeiträume zur Herbeiführung der Reaktivitätsänderungen zu berücksichtigen

Hinweis:

Die Anforderungen an die neutronenphysikalischen Eigenschaften der Steuerelemente werden in KTA 3101.2 und KTA 3103 behandelt.

(5) Auswaschbare oder nicht abriebfeste Absorbermaterialien oder Absorber, die mit dem Kühlmittel chemisch reagieren können, sind zu umhüllen.

(6) Falls Steuerelementkonstruktionen verwendet werden, bei denen das Absorbermaterial Radionuklide (z. B. Tritium) in das Kühlmittel freisetzt, ist nachzuweisen, dass die radiologischen Grenzwerte eingehalten werden.

(7) Die Steuerelemente sind so auszulegen, dass ein freier Steuerelementweg bei Betriebstemperatur entsprechend den Anforderungen der KTA 3103, Abschnitt 4.2 zur Verfügung steht.

Hinweis:

Voraussetzung für die ausreichende Gängigkeit der Steuerelemente ist die Kompatibilität der Steuerelemente mit den Brennelementen und den Brennelementkästen (beim SWR) sowie mit den RDB-Einbauten und Steuerelement-Antrieben, wobei neben der geometrischen Kompatibilität und thermohydraulischen Kompatibilität auch die mechanische Kompatibilität bzgl. Der wechselseitigen Belastungen berücksichtigt wird.

(8) Bei der Konstruktion der Steuerelemente ist sicherzustellen, dass das Eigengewicht der Steuerelemente zu keinen negativen Rückwirkungen hinsichtlich der geforderten Abschaltgeschwindigkeit gemäß KTA 3103 führt.

(9) Durch das Beschleunigen und Abbremsen der Steuerelemente dürfen keine unzulässigen Belastungen auf die Steuerelemente selbst, die Brennelemente, die RDB-Einbauten und die Steuerelement-Antriebe ausgeübt werden.

4.4.2 Nachweiskriterien für die Steuerelemente auf den Sicherheitsebenen 1 und 2

4.4.2.1 Verwendung geeigneten Absorbermaterials

(1) Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen gemäß 4.1.2 ist das Absorbermaterial so auszuwählen, dass die gemäß KTA 3103 geforderte neutronenphysikalische Wirkung über die Einsatzzeit gewährleistet ist.

4.4.2.2 Begrenzung der Temperatur des Absorbermaterials

(1) Die Schmelztemperatur des Absorbermaterials darf nicht erreicht werden.

Hinweis:

Um eine Verlagerung von Absorbermaterial durch das Schmelzen des Absorbers auszuschließen, darf der Schmelzpunkt des Absorbers nicht erreicht werden. Des Weiteren wird eine zusätzliche Dehnung der typischerweise das Absorbermaterial umgebenden Hülle durch eine Volumenvergrößerung des Absorbers beim Schmelzen oder eine Beschädigung der Hülle durch geschmolzenes Absorbermaterial vermieden.

4.4.2.3 Begrenzung der Spannungen in der Absorberhülle

(1) Die Spannungen in der Absorberhülle sind auf werkstoffspezifisch zulässige Werte zu begrenzen. Dabei sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Hinweis:

Im Verlauf der Einsatzzeit der Steuerelemente treten Spannungsbelastungen der Absorberhülle z. B. dadurch auf, dass beim Bewegen der Steuerelemente, insbesondere bei der Schnellabschaltung, Trägheitskräfte auf die Steuerelemente insgesamt und damit auch auf die Absorberhülle wirken. Ferner wird bei Verwendung bestimmter Absorbermaterialien wie Borcarbid (B_4C) durch die Neutronenabsorption ein Innendruck in der Absorberhülle aufgebaut.

4.4.2.4 Ermüdung der Absorberhülle, der Steuerelement-Strukturteile und der Verbindungen

(1) Zyklisch wechselnde thermische oder mechanische Belastungen können auch unterhalb der statischen mechanischen Festigkeit des Materials zu einem voranschreitenden Schädigungsprozess im Werkstoff führen. Die Beanspruchungen in den Bauteilen sind so zu begrenzen, dass kein Versagen in Folge von Ermüdung auftritt.

(2) Bei Nachweisen entsprechend (1) sind die im Anhang B 2.4 angegebenen Vorgehensweisen und Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Hinweis:

Beim Bewegen der Steuerelemente resultieren z. B. durch Trägheitskräfte auch dynamische Wechselspannungen in der Absorberhülle, in den Steuerelement-Strukturteilen sowie in den Schraubverbindungen, die zur Ermüdung beitragen können.

(3) Für die Steuerelemente, gefertigt aus dem austenitischen Stahl 1.4541, ist davon auszugehen, dass der Mediumseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit nicht wirksam ist, wenn gemäß [1] wenigstens einer der drei maßgeblichen Einflussfaktoren Dehnungsamplitude ε_a, mittlere Temperatur T und Dehnungsrate $\dot{\varepsilon}$ die in der Gleichung 4.4.2.4-1 definierten Schwellwerte über- bzw. unterschreitet. Konkret ist das dann der Fall, wenn die Dehnungsamplitude ($\varepsilon_a \leq 0{,}1$ %) oder die mittlere Temperatur ($T \leq 100$ °C) während des jeweils betrachteten Zyklus (bzw. der betrachteten Transiente) die ausgewiesenen Grenzwerte unterschreitet bzw. bezüglich der Dehnungsrate ($\dot{\varepsilon} > 10$ %/s) der Schwellwert überschritten wird. In diesem Fall ist der in der Ermüdungsanalyse zur Berücksichtigung des Mediumseinflusses verwendete Faktor F_{en} gleich 1,0 zu setzen.

Hinweis:

Für die Steuerelemente aus dem Werkstoff 1.4541 kann aufgrund der Belastungssituation in der Regel davon ausgegangen werden, dass die maßgeblichen Schwellwerte wirksam sind und der Faktor $F_{en} = 1{,}0$ gesetzt werden kann.

(4) Ist auf Grund der Belastungssituation die Wirksamkeit der Schwellwerte nicht gegeben, so ist der Mediumseinfluss in der Ermüdungsanalyse nach der in [1] beschriebenen Vorgehensweise zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass der Gesamterschöpfungsgrad den Wert 1,0 nicht überschreitet.

$$F_{en,i} = \exp\left(-T^* \cdot O^* \cdot \dot{\varepsilon}^*\right), \text{ mit} \qquad (4.4.2.4\text{-}1)$$

$F_{en,i} = 1$ für $\varepsilon_a \leq 0{,}1$ %
(geschmiedete, gewalzte und gegossene austenitische rostfreie Stähle)

$T^* = 0$	($T \leq 100$ °C)
$T^* = (T-100)/250$	(100 °C < T < 325 °C)
$\dot{\varepsilon}^* = 0$	($\dot{\varepsilon} > 10$ %/s)
$\dot{\varepsilon}^* = \ln(\dot{\varepsilon}/10)$	($0{,}0004 \leq \dot{\varepsilon} \leq 10$ %/s)
$\dot{\varepsilon}^* = \ln(0{,}0004/10)$	($\dot{\varepsilon} < 0{,}0004$ %/s)
$O^* = 0{,}29$	(< 0,1 ppm gelöster Sauerstoff im Reaktorwasser)

(alle geschmiedeten, gewalzten und gegossenen austenitischen rostfreien Stähle und Wärmebehandlungen sowie austenitische rostfreie Schweißgüter)

$O^* = 0{,}29$	(≥ 0,1 ppm gelöster Sauerstoff im Reaktorwasser)

(sensibilisierte hochkohlenstoffhaltige geschmiedete, gewalzte und gegossene austenitische rostfreie Stähle)

$O^* = 0{,}14$	(≥ 0,1 ppm gelöster Sauerstoff im Reaktorwasser)

(alle geschmiedeten und gewalzten austenitischen rostfreien Stähle außer sensibilisierte hochkohlenstoffhaltige austenitische rostfreie Stähle)

4.4.2.5 Geometrische Stabilität der Absorberhülle

(1) Elastisches Beulen und plastische Verformungen unter äußerem Überdruck sind auszuschließen.

Hinweis:

Die Hülle des Absorbers der Steuerelemente (beim DWR das Absorberhüllrohr, beim SWR absorberführende Teile) steht im allgemeinem durch die Druckdifferenz zwischen Kühlmittel und Innendruck unter einem äußeren Überdruck (beim DWR-Steuerelement über die gesamte Einsatzzeit, beim SWR-Steuerelement erfolgt im Laufe der Einsatzzeit ein innerer Druckaufbau, der in den Bereich des inneren Überdrucks gehen kann). Eine unter äußerem Überdruck stehende Hülle kann elastisch beulen oder, wenn die Spannungen die Streckgrenze überschreiten, eine plastische Verformung erleiden.

(2) Bei Nachweisen entsprechend (1) sind die im Anhang B angegebenen Vorgehensweisen und Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

4.4.2.6 Begrenzung der plastischen Dehnung der Absorberhülle

(1) Bei einer Dehnung des Hüllrohres durch den Absorber zum Beispiel durch Schwellen oder Wärmedehnung, ist die

plastische Vergleichsdehnung der Absorberhülle im Zugbereich auf werkstoffspezifisch zulässige Werte zu begrenzen.

Hinweis:

Zu Beginn des Einsatzes im Reaktor kann sich in den Steuerelementen unter Berücksichtigung der elastischen Stauchung der Absorberhülle durch den Kühlmitteldruck und der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Absorberhülle und Absorber ein Betriebsspiel zwischen Absorber und Absorberhülle einstellen. Die Absorberhülle steht dann infolge des äußeren Überdruckes unter Druckspannungen und kriecht auf den Absorber nieder. Gleichzeitig unterliegt der Absorber während des Einsatzes im Reaktor einem strahlungsinduzierten Schwellen. Nachdem durch diese beiden Effekte der Spalt zwischen Absorber und Absorberhülle geschlossen ist, wird die Absorberhülle durch das Absorberschwellen langsam gedehnt, wobei die Absorberhülle bis über die Ausgangslage hinaus gedehnt werden kann. Mit der Erfüllung der Anforderung gemäß (1) wird erreicht, dass die hierdurch bedingte plastische Vergleichsdehnung der Absorberhülle den für den verwendeten Werkstoff nachgewiesenen zulässigen Wert nicht überschreitet.

4.4.2.7 Begrenzung der Spannungen und Dehnungen in den Strukturteilen und Verbindungen

(1) Die Spannungen in den Steuerelement-Strukturteilen und den Verbindungen (z. B. Schweißverbindungen, Schraubverbindungen, Lötverbindungen, formschlüssige Verbindungen) sind zu begrenzen.

(2) Dabei dürfen materialspezifische Grenzen nicht überschritten werden für:

a) die Vergleichsspannungen in den Steuerelementstrukturteilen und Verbindungen,

b) die Scherspannungen in Verbindungen,

c) die Flächenpressung bei Schraubverbindungen zwischen Kopf oder Mutter und Auflagefläche sowie

d) die Schubspannungen in Druckfedern.

(3) Wenn aus Funktions- und Kompatibilitätsgründen spezifizierte Verformungsgrenzen eingehalten werden müssen, ist eine Verformungsanalyse durchzuführen.

(4) Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Hinweis:

Die Steuerelement-Strukturteile und die Verbindungen werden beim Bewegen der Steuerelemente während der Handhabung sowie im Reaktorkern, insbesondere bei der Schnellabschaltung, durch Trägheitskräfte belastet.

Beim DWR werden die Absorberstäbe der Steuerelemente in den Führungsrohren der Brennelemente und beim SWR die absorberführenden Strukturteile der Steuerelemente (kreuzförmig angeordnete Blätter) jeweils zwischen den vier Brennelementen einer Kernzelle bewegt. Um bei einer Schnellabschaltung die Belastungen der angrenzenden Komponenten, insbesondere der Brennelemente, und der Steuerelemente selbst zu begrenzen, werden die Steuerelemente kurz bevor sie vollständig im Reaktorkern sind, abgebremst.

Dies geschieht beim DWR typischerweise noch vor dem Auftreffen der Steuerelement-Struktur auf die Kopfplatte des Brennelementes beim Eintritt der Absorberstäbe in den im Innendurchmesser reduzierten unteren Bereich der Führungsrohre mittels hydraulischer Reibung. Die Geschwindigkeit wird soweit verringert, dass als zulässig für die angrenzenden Komponenten sowie die Steuerelemente nachzuweisende Auftreffgeschwindigkeiten nicht überschritten werden.

Beim SWR geschieht das Abbremsen typischerweise mittels Federpaketen, die im Steuerelementantrieb angeordnet sind.

4.4.2.8 Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität

(1) Es ist sicherzustellen, dass die für die Absorberhülle und Steuerelement-Strukturteile eingesetzten Werkstoffe eine ausreichende Duktilität aufweisen. Dabei sind betriebsbedingte Effekte, wie Neutronenversprödung oder Versprödung durch Wasserstoffaufnahme, sowie deren Beeinflussung durch den Spannungszustand (siehe B 2.3 und B 2.5) werkstoffspezifisch zu berücksichtigen.

4.4.3 Nachweiskriterien für die Steuerelemente auf den Sicherheitsebenen 3 und 4a

4.4.3.1 Begrenzung der Temperatur des Absorbermaterials

(1) Beeinträchtigungen der Abschaltbarkeit und der ausreichenden Kühlung des Reaktorkerns durch umverlagertes Absorbermaterial sind auszuschließen. Dies ist im Allgemeinen gezeigt, wenn die Schmelztemperatur des Absorbermaterials nicht erreicht wird.

Hinweis:

Um eine Verlagerung von Absorbermaterial außerhalb des Steuerelementes oder, sofern es von einer Hülle umschlossen ist, innerhalb des Steuerelementes durch das Schmelzen des Absorbers auszuschließen, darf der Schmelzpunkt des Absorbers nicht erreicht werden. Des Weiteren wird bei Unterschreiten der Schmelztemperatur eine zusätzliche Dehnung der typischerweise das Absorbermaterial umgebenden Hülle durch eine Volumenvergrößerung des Absorbers beim Schmelzen oder eine Beschädigung der Hülle durch aufgeschmolzenes Absorbermaterial vermieden.

4.4.3.2 Begrenzung der Spannungen in der Absorberhülle, den Strukturteilen und Verbindungen

(1) Auf der Sicherheitsebene 3 sowie für SWR-Steuerelemente auch auf der Sicherheitsebene 4a sind die primären Spannungen in der Absorberhülle, in den Steuerelement-Strukturteilen und den Verbindungen (z. B. Schraubverbindungen, Schweißverbindungen, Lötverbindungen, formschlüssige Verbindungen) zu begrenzen.

(2) Dabei dürfen materialspezifische Grenzen nicht überschritten werden für:

a) die Vergleichsspannungen in der Absorberhülle, in den Steuerelement-Strukturteilen und Verbindungen und

b) die Scherspannungen in Verbindungen.

(3) Bei der Nachweisführung sind für die Sicherheitsebene 3 und für SWR-Steuerelemente auch für die Sicherheitsebene 4a die im Anhang B für Sicherheitsebene 3 angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Hinweis:

Für die Analyse der Ereignisse auf der Sicherheitsebene 4a (Ereignisse mit unterstelltem Ausfall des Schnellabschaltsystems, ATWS) ist gemäß KTA 3103 sicherzustellen, dass neben dem Schnellabschaltsystem ein weiteres Abschaltsystem vorhanden ist, welches in der Lage ist, den Reaktor unterkritisch zu machen und langfristig unterkritisch zu halten. Beim SWR werden hierzu die Steuerelemente mit einem zum Schnellabschaltsystem diversitären elektromechanischen Antrieb verwendet. Beim DWR können für diese Funktion alternativ oder zusammen auch mehrere Boreinspeisesysteme herangezogen werden.

4.4.4 Komponentenspezifische Anforderungen für Transport, Handhabung und Lagerung

(1) Die Kompatibilität der Steuerelemente mit den Transport-, Handhabungs- und Lagerungseinrichtungen muss gegeben sein.

(2) Die im Zuge der Herstellung nachgewiesene Qualität der Steuerelemente darf durch die während Transport, Handhabung und Lagerung auftretenden Belastungen nicht in einer Form beeinträchtigt werden, welche zu Einschränkungen bezüglich des weiteren Einsatzes führen.

(3) Hierzu ist nachzuweisen, dass

a) die bei Transport, Handhabung und Lagerung auftretenden Spannungen und Dehnungen auf werkstoffspezifisch zulässige Werte begrenzt werden. Bei der Nachweisführung sind die im Anhang B für die Sicherheitsebenen 1 und 2 angegebenen Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

b) Oberflächenbeschädigungen an den Steuerelementen z. B. infolge der Relativbewegung zwischen Steuerelementen und den Lagerpunkten auf einen zulässigen Wert begrenzt werden.

(4) Die Nachweise dürfen über Rechnungen oder über die Qualifikation der Transporte erbracht werden.

4.5 Drosselkörper

(1) Für die Drosselkörper ist nachzuweisen, dass die Funktion während der gesamten Einsatzzeit erhalten bleibt und keine unzulässigen Rückwirkungen auf andere Komponenten auftreten.

(2) Auf der Sicherheitsebene 1 ist nachzuweisen, dass die Resultierende aller axial auf den Drosselkörper wirkenden Kräfte eine Kontaktkraft auf den Brennelementkopf bewirkt.

(3) Die Festigkeitsauslegung, einschließlich der Nachweise zu Transport, Handhabung und Lagerung, ist analog zur Strukturauslegung der Steuerelemente vorzunehmen.

Hinweis:

Aufgrund der geringen Belastungen bei hochzyklischen Vorgängen oder den geringen Lastspielzahlen bei höheren Belastungen und unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung ist ein Mediumseinfluss auf die Ermüdung bei diesen Komponenten nicht zu erwarten.

(4) Die geometrische Ausführung ist so zu gestalten, dass die Anforderungen der KTA 3101.1 erfüllt werden.

5 Weitere allgemeine Anforderungen

5.1 Anforderungen an die Nachweisführung bei der Auslegung

5.1.1 Allgemeines

(1) Das sicherheitstechnische Ziel der Auslegung der Kernbauteile ist es, alle in den jeweiligen Sicherheitsebenen zu berücksichtigenden Beanspruchungen zu ermitteln und die Ausführung der Kernbauteile so zu wählen (z. B. durch geeignete Dimensionierung und geeignete Werkstoffe), dass die in Abschnitt 4 genannten Anforderungen über die gesamte vorgesehene Einsatzzeit erfüllt werden.

(2) Dabei sind alle bedeutsamen Effekte gemäß 4.1.1 (2) zu berücksichtigen.

(3) Die Nachweisführung muss zeigen, dass

a) alle Belastungen, die bei den zu unterstellenden Lastfällen in den jeweiligen Sicherheitsebenen anzunehmen sind, so abgetragen werden, dass die Nachweiskriterien gemäß Abschnitt 4 eingehalten werden,

b) die Kernbauteile sicher gehandhabt, transportiert und gelagert werden können,

c) die Kompatibilität der Kernbauteile untereinander und mit den angrenzenden Systemen gegeben ist,

d) die für die jeweiligen Bauteile verwendeten Werkstoffe den im Einsatz zu erwartenden chemischen, mechanischen, thermischen und strahlungsbedingten Belastungen standhalten,

e) Annahmen und Randbedingungen, die den Nachweisen der angrenzenden Systeme und Analysenbereiche auf der jeweiligen Sicherheitsebene zu Grunde liegen, berücksichtigt werden, wie

ea) Kritikalitätssicherheit bei Handhabung, Transport und Lagerung,

eb) neutronenphysikalische Auslegung des Reaktorkerns,

ec) thermohydraulische Auslegung des Reaktorkerns und der Anlage,

ed) Verhalten der Abschaltsysteme.

f) Wechselwirkungen zwischen der thermohydraulischen und neutronenphysikalischen Auslegung und der thermomechanischen Auslegung (z. B. in Folge von Brennelementverformungen) bewertet und ggf. berücksichtigt sind.

g) die Annahmen und Randbedingungen, die sich aus der Herstellung der Kernbauteile ergeben (wie Fertigungstoleranzen, Qualität von Schweißnähten, etc.), berücksichtigt werden und

h) die Erfahrungen aus dem Betrieb berücksichtigt werden.

5.1.2 Nachweismethodik

(1) Die Nachweise sind mit geeigneten Verfahren zu führen.

(2) Zum Nachweis können

a) deterministische Analysen,

b) statistische Analysen,

c) ingenieurmäßige Bewertungen,

d) Ergebnisse aus der Auswertung von Versuchen und Experimenten,

e) Ergebnisse aus der Auswertung von Betriebserfahrungen

oder Kombinationen aus a) bis e) herangezogen werden.

5.1.3 Nachweisumfang und Nachweistiefe

(1) In den Auslegungsnachweisen sind mindestens die folgenden Punkte zu behandeln:

a) Nachweis der Einhaltung der Nachweiskriterien an die Kernbauteile für alle Sicherheitsebenen,

b) Belegung der verwendeten Auslegungsgrundlagen.

Hinweis:

Solche Grundlagen sind z. B.:

- Beschreibung und Validierung der Berechnungsmodelle und Materialgesetze,
- Beschreibung und Ergebnisse von Versuchen an Bauteilen und Materialuntersuchungen an bestrahltem oder unbestrahltem Material.

(2) In den Nachweisen sind die berücksichtigten Randbedingungen anzugeben. Mindestens sind darzustellen:

a) angenommene Lastfälle,

b) angenommene Lasten,

c) verwendete Geometrie- und Materialdaten und

d) Kompatibilitätsdaten aus den angrenzenden Systemen und Kernbauteilen.

(3) Weiterhin sind anzugeben

a) verwendete Modelle und Materialeigenschaften,

b) Berechnungsmethodik im Falle von Berechnungen,

c) Randbedingungen der Versuche im Falle von versuchsbasierten Nachweisen und

d) Erkenntnisse aus Betriebserfahrungen, soweit für die Nachweisführung verwendet.

(4) Der Detaillierungsgrad der eingesetzten Analyseverfahren sowie der verwendeten Modellierung orientiert sich an der Aufgabenstellung und an der geforderten Genauigkeit des Nachweises.

(5) Experimentelle Nachweise sind so zu führen, dass eine Übertragung auf die realen Verhältnisse gegeben ist. Bei der

Konzeption, Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen müssen folgende Parameter berücksichtigt werden:

a) Einfluss des Modellmaßstabes,

b) Unterschiede in den Abmessungen von tatsächlichem Bauteil und Versuchsbauteil,

c) Unterschiede in den bestimmenden Werkstoffeigenschaften und

d) Anzahl der Versuche.

5.1.4 Unsicherheiten in der Nachweisführung

(1) Bei der Nachweisführung auf den Sicherheitsebenen 1 bis 3 sind die relevanten Beanspruchungen und Randbedingungen so zu wählen, dass die Unsicherheiten bei der Anwendung der Methoden nach 5.1.2 (2) so berücksichtigt sind, dass ein konservatives Ergebnis im Hinblick auf das Nachweisziel erreicht wird.

(2) Hierbei sind unter anderem die Unsicherheiten in:

a) den Herstellungstoleranzen, der Geometrie und den Materialeigenschaften,

b) den Berechnungsmodellen und

c) den betrieblichen Variationsbreiten

zu berücksichtigen.

(3) Für die Analyse sind

a) die Parameter (Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter) und Modelle zu identifizieren, die die Ergebnisunsicherheiten wesentlich beeinflussen,

b) die gemäß dem aktuellen Kenntnisstand vorhandenen Unsicherheitsbandbreiten der identifizierten Parameter zu quantifizieren, bei Einsatz von statistischen Verfahren mitsamt den Verteilungen der Parameter, sowie

c) Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen einzelnen Parametern festzustellen und zu berücksichtigen.

(4) Unsicherheiten können im Rahmen einer deterministischen Analyse erfasst werden durch

a) Anwendung standardisierter abgesicherter Verfahren oder Daten, aus denen die Unsicherheit oder ein gesicherter Abstand zum Nachweiskriterium abgeleitet werden kann,

b) Zuschläge auf das Ergebnis, die aus der Validierung des Analyseverfahrens, aus experimentellen Ergebnissen oder Betriebserfahrungen abzuleiten sind,

c) Kombination der in Bezug auf das Nachweiskriterium ungünstigsten Werte des Unsicherheitsbereichs der einzelnen Parameter oder

   Hinweis:

   Unter der Voraussetzung, dass das Ergebnis eine monoton steigende oder fallende Funktion der Eingangsparameter ist, liefern die Randwerte der Eingangsparameter die Extremwerte.

d) Verwendung hinreichend konservativ gewählter Einzelparameter oder Modelle, für welche in einem vergleichbaren Fall nachgewiesen ist, dass die Unsicherheiten bezüglich des jeweiligen Nachweiskriteriums abgedeckt werden.

(5) Die Einhaltung statistischer Nachweiskriterien ist mit einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % nachzuweisen.

(6) Werden bei der Ermittlung der Gesamtunsicherheit statistische Verfahren angewandt (z. B. gemäß DIN ISO 16269-6), so ist die in Richtung des Nachweiskriteriums gehende einseitige Toleranzgrenze des Ergebniswertes zu ermitteln, wobei für die Einhaltung des Nachweiskriteriums eine Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % mit einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % nachzuweisen ist.

5.1.5 Validierung von Analyseverfahren

(1) Die eingesetzten Analyseverfahren (z. B. Rechenprogramme) müssen validiert sein.

(2) Bei der Validierung wird unterschieden zwischen der Validierung des gesamten für den jeweiligen Anwendungsbereich verwendeten Berechnungssystems (integrale Validierung) und einzelner Komponenten des Berechnungssystems (partielle Validierung). Neben der integralen Validierung des Berechnungssystems sollte der Anwendungsbereich durch partielle Validierung der Einzelkomponenten nachgewiesen werden.

   Hinweis:

   Partielle und integrale Validierung ergänzen sich und werden in der Regel kombiniert. Bei der alleinigen Verwendung von integralen Verfahren kann eine Fehlerkompensation nicht ausgeschlossen werden. Deshalb ist die Extrapolierbarkeit im Anwendungsbereich geringer zu veranschlagen. Andererseits kann bei alleiniger Verwendung von partiellen Verfahren der Nachweis der vollständigen Abdeckung des Gesamtsystems durch einzelne Validierungsschritte schwierig sein.

(3) Die in Analyseverfahren (z. B. Berechnungsprogramme) verwendeten Modelle müssen die abzubildenden realen Zustände und Vorgänge im Hinblick auf das Nachweisziel hinreichend genau beschreiben.

(4) Zur Validierung sind die Ergebnisse der Analyseverfahren mit Referenzlösungen, die aus Ergebnissen von Experimenten, Materialuntersuchungen, Standardproblemen oder den Ergebnissen anderer validierter Analyseverfahren gewonnen werden, zu vergleichen. Der Grad der Übereinstimmung (systematische und unsystematische Abweichungen) ist zu bestimmen. Systematische Abweichungen sind gesondert zu bewerten.

(5) Referenzlösungen sollten den Anwendungsbereich hinsichtlich der wesentlichen Parameter überdecken. In Fällen, in denen eine Nachbildung der realen Reaktorbedingungen nicht erfolgt, muss die Übertragbarkeit der Referenzlösungen auf Reaktorverhältnisse begründet werden.

(6) Der Gültigkeitsbereich eines Berechnungsmodells ergibt sich aus der Validierung des Berechnungsmodells. Der Gültigkeitsbereich ist anzugeben. Das Berechnungsmodell darf über den nachgewiesenen Gültigkeitsbereich hinaus angewendet werden (Extrapolation), wenn die Zulässigkeit der Extrapolationen begründet wird.

(7) Die Validierung auf der Sicherheitsebene 1 und 2 ist möglichst realitätsnah an Hand tatsächlich auftretender Ereignisse oder Lasten vorzunehmen.

(8) Für die Validierung auf der Sicherheitsebene 3 soll soweit möglich auf Ergebnisse der Sicherheitsebenen 1 und 2 zurückgegriffen werden. Ergänzend ist die Validierung an Hand repräsentativer Versuche vorzunehmen.

(9) Auf der Sicherheitsebene 4a sind möglichst Modelle anzuwenden, die auch für Nachweise auf der Sicherheitsebene 3 eingesetzt werden. Ist dies nicht möglich, sind die Modelle entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand aufzubauen.

5.1.6 Verifikation

(1) Rechenverfahren und Modelle, die bei der Nachweisführung eingesetzt werden, müssen verifiziert sein.

5.1.7 Dokumentation

Die Nachweise gemäß 5.1.1 bis 5.1.6 sind nachvollziehbar zu dokumentieren, so dass eine Überprüfung durch Fachleute möglich ist.

5.2 Anforderungen an die Herstellung

(1) Die Herstellung darf nur nach vorgeprüften Unterlagen (Vorprüfunterlagen) erfolgen.

(2) Die Vorprüfunterlagen bestehen mindestens aus Stücklisten, Zeichnungen und Spezifikationen.

(3) Die an die Herstellung zu stellenden Anforderungen sind in den Vorprüfunterlagen eindeutig festzulegen. Hierzu zählen u. a. die konstruktive Ausführung einschließlich Toleranzbereich, die verwendeten Werkstoffe, die Werkstoffeigenschaften, die Oberflächenbeschaffenheit, die Fertigungs- und Prüfverfahren, der Umfang der Qualitätsprüfungen sowie Art und Umfang der zu erstellenden Qualitätsnachweise. Ebenfalls ist festzulegen, ob die Prüfung durch die Fertigung oder durch eine fertigungsunabhängige Qualitätsstelle zu erfolgen hat.

(4) Die bei der Auslegung zu Grunde gelegten herstellungsrelevanten Eigenschaften müssen die in den Vorprüfunterlagen festgelegten Eigenschaften abdecken.

5.3 Anforderungen an den Transport

(1) Die Transportmittel, die Transportwege und die Verpackung sind so zu wählen, dass die in den Qualitätsnachweisen bescheinigte Qualität sowie die Funktionalität der Kernbauteile erhalten bleibt.

Hinweis:
Beim Transport von Kernbrennstoff gelten aufgrund anderer Vorschriften weitere Anforderungen an Verpackung und Behälter.

(2) Es ist sicherzustellen, dass die beim Transport auftretenden Belastungen innerhalb der bei der Auslegung angenommenen Belastungen liegen.

(3) Die Begrenzung der Belastungen ist durch geeignete Nachweise z. B. Transportqualifikation oder Beschleunigungsüberwachung zu belegen.

(4) Beim Transport können im Einzelfall Belastungen auftreten (z. B. Beschleunigungen), die Auswirkungen auf die Produktqualität bzw. die Einsatzfähigkeit von Kernbauteilen haben. Sofern diese Belastungen durch die Auslegung nicht abgedeckt sind, muss die Verwendbarkeit gesondert bewertet werden (siehe 4.2.4 und 4.4.4).

5.4 Anforderungen an Einsatzplanung und Betrieb

(1) Die Einsatzplanung und der Betrieb der Kernbauteile haben so zu erfolgen, dass

a) die den thermomechanischen Auslegungsnachweisen der Kernbauteile auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a zu Grunde gelegten Randbedingungen wie
   aa) Betriebsparameter des Reaktors (u. a. Druck und Temperatur des Primärkühlmittels sowie Kühlmittelchemie)
   ab) Leistungsgrenzen,
   ac) Leistungsrampen oder –sprünge, Leistungsgeschichten,
   ad) zeitliche Begrenzungen der Einsatzzeit,
   ae) Begrenzungen der Lastfallhäufigkeit

   eingehalten und

b) die mit dem Einsatz von Kernbauteilen gewonnenen Betriebserfahrungen berücksichtigt werden.

(2) Die Einsatzplanung und der Betrieb der Kernbauteile haben so zu erfolgen, dass die im Rahmen der Auslegung für anomalen Betrieb und Störfälle zu Grunde gelegten Ausgangszustände des Normalbetriebs eingehalten werden.

Anhang A

Tabellarische Übersicht der sicherheitstechnischen Anforderungen

A 1 Brennelemente

Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) und 2 (Anomaler Betrieb)	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Leistungsanpassung oder Reaktorabschaltung	- Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität erforderlichen Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen Nachweisziel: Uneingeschränkte Weiterverwendbarkeit der Brennelemente	- Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass zulässige Werte der Leistung und der Leistungsdichte eingehalten werden. - Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der BE eingehalten werden. - Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die in KTA 3101.1 festgelegten Anforderungen hinsichtlich der kritischen Siedezuständen/Wärmestromdichten eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	- Beschaffenheit und Betrieb der Brennelemente derart, dass die Dichtheit der Brennstäbe gewährleistet wird.
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Die Strahlenexposition des Personals ist bei allen Tätigkeiten unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung so gering wie möglich zu halten. - Jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt durch Direktstrahlung aus der Anlage sowie durch die Ableitung radioaktiver Stoffe unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung ist so gering wie möglich zu halten.	- Verwendung geeigneter Werkstoffe zur Minimierung der Strahlenexposition.

Tabelle A 1-1: Sicherheitstechnische Anforderungen an Brennelemente, Sicherheitsebenen 1 und 2

Sicherheitsebene 3: Störfälle	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Reaktorabschaltungv	- Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität und Leistungsdichte erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Sicherstellung der Wärmeabfuhr aus den Brennstäben, den Brennelementen und aus dem Kern (der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen; SiAnf 2.3(2)) Nachweisziel: Abschalt-und Kühlbarkeit des Reaktorkerns	- Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	- Auslegung der Brennelemente derart, dass ereignisspezifische Anforderungen an die Dichtheit der Brennstäbe gewährleistet werden.
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Es sind die radiologischen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.	Abgedeckt durch die Anforderungen im Rahmen des Schutzziels B „Einschluss radioaktiver Stoffe“.

Tabelle A 1-2: Sicherheitstechnische Anforderungen an Brennelemente, Sicherheitsebene 3

Sicherheitsebene 4a: Sehr seltene Ereignisse	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Reaktorabschaltung	- Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Kontrolle der Reaktivität und Leistungsdichte erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen. Nachweisziel: Abschalt-und Kühlbarkeit des Reaktorkerns	- Auslegung der Brennelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften der Brennelemente eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	keine [1]
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Brennelemente**
- Es sind die radiologischen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.	keine [1]
[1] Für die Brennelemente gilt kein spezifisches radiologisches Sicherheitsziel. Die allgemeinen radiologischen Sicherheitsziele gemäß SiAnf Nummer 2.5 gelten immer	

Tabelle A 1-3: Sicherheitstechnische Anforderungen an Brennelemente, Sicherheitsebene 4a

A 2 Steuerelemente

Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) und 2 (Anomaler Betrieb)	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Leistungsanpassung oder Reaktorabschaltung	- Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass die zur Erfüllung der Anforderungen der KTA 3101.2 und KTA 3103 hinsichtlich Leistungsregelung und Abschaltung erforderliche Geometrie und Form der Steuerelemente, einschließlich der Menge, Geometrie (Form und Lage) und Materialeigenschaften des Absorbermaterials eingehalten sind. - Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass sie unter Berücksichtigung ihres Eigengewichts und der auftretenden Belastungen hinreichend schnell gemäß den Anforderungen der KTA 3101.2 und der KTA 3103 in den Reaktorkern eingebracht werden können.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen. Nachweisziel: Uneingeschränkte Weiterverwendbarkeit der Brennelemente	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	- Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Die Strahlenexposition des Personals ist bei allen Tätigkeiten unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung so gering wie möglich zu halten. - Jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt durch Direktstrahlung aus der Anlage sowie durch die Ableitung radioaktiver Stoffe unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung ist so gering wie möglich zu halten.	- Beschaffenheit und Betrieb der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.

Tabelle A 2-1: Sicherheitstechnische Anforderungen an Steuerelemente, Sicherheitsebenen 1 und 2

Sicherheitsebene 3: Störfälle	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Reaktorabschaltung	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass die zur Erfüllung der Anforderungen der KTA 3101.2 und KTA 3103 hinsichtlich Abschaltung erforderliche Geometrie und Form der Steuerelemente, einschließlich der Menge, Geometrie (Form und Lage) und Materialeigenschaften des Absorbermaterials eingehalten sind. - Auslegung der Steuerelemente derart, dass sie unter Berücksichtigung ihres Eigengewichts und der auftretenden Belastungen hinreichend schnell in den Reaktorkern entsprechend den Anforderungen der KTA 3101.2 und KTA 3103 eingebracht werden können.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen. Nachweisziel: Abschalt-und Kühlbarkeit des Reaktorkerns	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Es sind die radiologischen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen durch die Steuerelemente erfolgen.

Tabelle A 2-2: Sicherheitstechnische Anforderungen an Steuerelemente, Sicherheitsebene 3

Sicherheitsebene 4a: Sehr seltene Ereignisse	
Schutzziel R: Kontrolle der Reaktivität	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Reaktivitätsänderungen sind auf zulässige Werte zu beschränken. - Der Reaktorkern muss abgeschaltet und langfristig unterkritisch gehalten werden können. Nachweisziel: Reaktorabschaltung	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass die zur Erfüllung der Anforderungen der KTA 3101.2 und KTA 3103 hinsichtlich Abschaltung erforderliche Geometrie und Form der Steuerelemente, einschließlich der Menge, Geometrie (Form und Lage) und Materialeigenschaften des Absorbermaterials eingehalten sind. - Auslegung der Steuerelemente derart, dass sie unter Berücksichtigung ihres Eigengewichts und der auftretenden Belastungen hinreichend schnell in den Reaktorkern entsprechend den Anforderungen der KTA 3101.2 und KTA 3103 eingebracht werden können.
Schutzziel K: Kühlung der Brennelemente	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Der Wärmetransport vom Brennstoff bis zur Wärmesenke ist sicherzustellen. Nachweisziel: Abschalt-und Kühlbarkeit des Reaktorkerns	- Auslegung der Steuerelemente derart, dass die für die Wärmeabfuhr aus den Brennelementen erforderliche Geometrie (Form und Lage) und die erforderlichen Materialeigenschaften eingehalten werden.
Schutzziel B: Einschluss radioaktiver Stoffe	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.3 (2)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Die sich auf den verschiedenen Sicherheitsebenen ergebenden mechanischen, thermischen, chemischen und durch Strahlung hervorgerufenen Einwirkungen auf die Barrieren oder Rückhaltefunktionen sind so zu begrenzen, dass deren Wirksamkeit zur Einhaltung der unter Nummer 2.5 angegebenen radiologischen Sicherheitsziele erhalten bleibt. Nachweisziel: Erhalt der Barrierenintegrität	keine [1]
Sicherheitsziel S: Begrenzung der Strahlenexposition	
Anforderungen gemäß SiAnf 2.5 (1)	**Anforderungen an Steuerelemente**
- Es sind die radiologischen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten.	keine [1]
[1] Für die Steuerelemente gilt kein spezifisches radiologisches Sicherheitsziel. Die allgemeinen radiologischen Sicherheitsziele gemäß SiAnf 2.5 gelten immer.	

Tabelle A 2-3: Sicherheitstechnische Anforderungen an Steuerelemente, Sicherheitsebene 4a

Anhang B

Anforderungen an analytische und experimentelle Festigkeitsnachweise

B 1 Allgemeine Festlegungen ... 25
B 2 Analytische Festigkeitsnachweise ... 25
B 2.1 Allgemeines ... 25
B 2.2 Spannungsanalyse ... 25
B 2.2.1 Elastische Analyse ... 25
B 2.2.2 Plastische Analyse ... 26
B 2.2.3 Grenztragfähigkeitsanalyse ... 26
B 2.3 Verformungsanalyse ... 26
B 2.4 Ermüdungsanalyse ... 26
B 2.4.1 Allgemeingültige Festlegungen ... 26
B 2.4.2 Vergleichsspannungsschwingbreiten ... 26
B 2.4.3 Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl ... 27
B 2.4.4 Erschöpfungsgrad ... 28
B 2.4.5 Analyse von fortschreitender Deformation ... 28
B 2.5 Bewertung des Sprödbruchrisikos ... 28
B 2.6 Stabilitätsanalyse ... 28
B 2.6.1 Allgemeines ... 28
B 2.6.2 Beulen von druckbeaufschlagten zylindrischen Bauteilen ... 28
B 2.6.3 Knicken stabförmiger Strukturen ... 28
B 2.7 Nachweise für Verbindungselemente ... 29
B 2.7.2 Schraubverbindungen ... 29
B 2.7.3 Schweißverbindungen ... 29
B 3 Auslegung mit experimentellen Methoden ... 29
B 4 Tabellen der Sicherheitsbeiwerte ... 30
B 4-2 Tabelle der Sicherheitsbeiwerte und der zulässigen Spannungen für die Sicherheitsebene 3 ... 33
B 5 Ermüdungskurven ... 35
B 5.1 Ermüdungskurven für ferritische Stähle ... 35
B 5.2 Ermüdungskurven für die austenitischen Stähle 1.4550 und 1.4541 ... 36
B 5.3 Ermüdungskurven für austenitische Stähle außer den Stählen 1.4550 und 1.4541 ... 37
B 5.4 Ermüdungskurven für unbestrahltes Zircaloy-2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C ... 38
B 5.5 Ermüdungskurven für bestrahltes[1)] Zircaloy- 2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C ... 39
B 5.6 Tabellenwerte und Berechnungsvorschrift für die Ermüdungskurven für unbestrahltes und bestrahltes Zirkaloy-2, 3, und 4 ... 40

B 1 Allgemeine Festlegungen

(1) Zu den Festigkeitsnachweisen gehören die Spannungs-, Ermüdungs-, Verformungs- und Stabilitätsanalyse.

(2) Die Ermittlung der Beanspruchungen kann analytisch oder experimentell oder in Kombination beider erfolgen.

Hinweis:

Die nachzuweisenden komponentenspezifischen Anforderungen finden sich im Regeltext.

Dieser Anhang stellt Methoden zur Verfügung, mit denen Festigkeitsnachweise geführt werden können. Er konkretisiert die diesbezüglichen Anforderungen aus dem Regeltext und legt für die jeweiligen Methoden Sicherheitsbeiwerte fest.

B 2 Analytische Festigkeitsnachweise

B 2.1 Allgemeines

(1) Der Nachweis kann auf allen Sicherheitsebenen durch eine elastische oder eine Grenztragfähigkeitsanalyse und auf Sicherheitsebene 3 zusätzlich durch eine plastische Analyse erbracht werden.

Hinweis:

Voraussetzung für eine elastische Analyse ist eine Zuordnung der auftretenden Spannungen zu den Spannungskategorien in Abschnitt B 2.2.1.1

(2) Im Rahmen einer elastischen Analyse werden die Spannungen und im Rahmen einer plastischen Analyse die Spannungen und plastischen Dehnungen bewertet.

(3) Analysen zu Verbindungselementen werden in Abschnitt B 2.7 behandelt.

B 2.2 Spannungsanalyse

B 2.2.1 Elastische Analyse

B 2.2.1.1 Spannungskategorien

B 2.2.1.1.1 Allgemeines

(1) Für die Analyse sind die Spannungen in Abhängigkeit von der erzeugenden Ursache und ihrer Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten des Bauteils in primäre Spannungen, sekundäre Spannungen und Spannungsspitzen einzuteilen und nach ihrer Zuordnung in unterschiedlicher Weise zu begrenzen.

(2) Erscheint die Zuordnung zu einer der genannten Spannungskategorien nicht eindeutig, ist die Auswirkung einer plastischen Verformung auf das Tragverhalten im Falle einer angenommenen Steigerung der vorgesehenen Belastung als maßgebend für die Zuordnung anzusehen.

B 2.2.1.1.2 Primäre Spannungen

(1) Primäre Spannungen sind solche Spannungen, die das Gleichgewicht mit äußeren Kraftgrößen (Lastgrößen) herstellen.

(2) Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens ist ihr wesentliches Merkmal, dass bei einer (unzulässig großen) Steigerung der äußeren Lasten die Verformungen nach vollständiger Plastifizierung des Querschnitts wesentlich zunehmen, ohne sich hierbei selbst zu begrenzen.

(3) Die primären Spannungen sind nach deren Verteilung über den für das Tragverhalten zugrunde zu legenden Querschnitt eines Bauteils in Membranspannungen (Pm) und in Biegespannungen (Pb) zu unterscheiden. Hierbei sind die Membranspannungen definiert als Mittelwert der über die Wanddicke verteilten Spannungen. Die Biegespannungen sind definiert als der linear veränderliche Anteil der über die Wanddicke verteilten Spannungen. Bei unsymmetrischen Querschnitten sind die Spannungen jeweils nach den vorhandenen Flächen zu wichten.

(4) Treten an Störstellen lokale Membranspannungen auf, so können diese gesondert bewertet werden, z. B. mit einer Grenztragfähigkeitsanalyse.

B 2.2.1.1.3 Sekundäre Spannungen

(1) Die grundlegende Eigenschaft einer Sekundärspannung ist, dass sie sich selbst begrenzt. Örtliches Plastifizieren und geringe Formänderungen können die Folge eines Auftretens dieser Spannung sein. Ein Versagen infolge einer einmaligen Lastaufbringung ist nicht zu erwarten.

(2) Beispiele für Sekundärspannungen (Q) sind Spannungen, die bei mechanischer oder thermischer Belastung infolge

a) geometrischer Unstetigkeiten,
b) unterschiedlicher elastischer Konstanten (z.B. Elastizitätsmodulen) sowie
c) unterschiedlicher Wärmedehnungen oder Festkörperschwellen

entstehen.

(3) Für die elastische Analyse werden nur Spannungen aus dem linearisierten Verlauf der Spannungsverteilung zu den Sekundärspannungen gezählt.

B 2.2.1.1.4 Spannungsspitzen

Spannungsspitzen sind solche Spannungsanteile, die der Summe von primären und sekundären Spannungen überlagert sind. Da sie nur in örtlich eng begrenzten Bereichen auftreten, haben sie keine merklichen Verformungen zur Folge und sind in Verbindung mit primären und sekundären Spannungen nur für die Ermüdung (siehe B 2.4) und Sprödbruchgefährdung (siehe B 2.5) von Bedeutung.

B 2.2.1.2 Spannungsüberlagerung und Spannungsbeurteilung

B 2.2.1.2.1 Allgemeines

(1) Die gleichzeitig wirkenden

a) primären Membranspannungen,
b) primären Membran- und Biegespannungen und
c) primären Membran- und Biegespannungen sowie Sekundärspannungen

sind jeweils zu Spannungssummen zu addieren.

(2) Aus diesen Spannungssummen werden die in den folgenden Abschnitten für die Spannungsbewertung erforderlichen Vergleichsspannungen gebildet.

B 2.2.1.2.2 Vergleichsspannungen

(1) Die Vergleichsspannungen sind nach Festlegung eines dreiachsigen Koordinatensystems aus den Spannungssummen der primären und sekundären Spannungen nach einer geeigneten Festigkeitshypothese zu bilden.

(2) Die Vergleichsspannungen sind auf werkstoffspezifisch zulässige Werte zu begrenzen.

(3) Die in den **Tabellen B 4-1** und **B 4-2** werkstoff- und komponentenspezifisch angegebenen Sicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der zulässigen Spannungen gelten nur bei Verwendung der Festigkeitshypothesen nach v. Mises oder Tresca.

H i n w e i s :

Die Anwendung dieser Festigkeitshypothesen setzt ein duktiles Werkstoffverhalten voraus. Dies ist durch die Einhaltung der Anforderungen gemäß Abschnitt 4 hinsichtlich Duktilität erfüllt.

B 2.2.2 Plastische Analyse

Bei der Durchführung der plastischen Analyse ist entsprechend der Methodik der KTA 3204 vorzugehen.

B 2.2.2.1 Spannungskategorien

Die mittels einer plastischen Analyse auf Sicherheitsebene 3 ermittelten primären Spannungen nach Abschnitt B 2.2.1.1.2 sind gemäß Tabelle B 4-2 zu begrenzen. Zusätzlich ist eine Verformungsanalyse gemäß B 2.3 im Hinblick auf lokales Versagen durchzuführen.

B 2.2.2.2 Vergleichsspannungen

(1) Die Vergleichsspannungen sind nach Festlegung eines dreiachsigen Koordinatensystems aus den Spannungssummen der primären Spannungen nach einer geeigneten Festigkeitshypothese zu bilden.

(2) Die Vergleichsspannungen sind auf werkstoffspezifisch zulässige Werte zu begrenzen.

(3) Die in der Tabelle **B 4-2** werkstoff- und komponentenspezifisch angegebenen Sicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der zulässigen Spannungen gelten nur bei Verwendung der Festigkeitshypothesen nach v. Mises oder Tresca.

H i n w e i s :

Das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs kann sowohl für die wirkliche monotone Spannungsdehnungskurve bei Belastungstemperatur als auch für jede Annäherung der wirklichen Spannungsdehnungskurve herangezogen werden, wobei die Annäherung jedoch für gleiche Dehnungen überall geringere Spannungen aufweisen muss als die wirkliche Kurve.

B 2.2.3 Grenztragfähigkeitsanalyse

Grenztragfähigkeitsanalysen sind gemäß Anhang B der KTA 3204 durchzuführen.

B 2.3 Verformungsanalyse

(1) Wenn aus Funktions- oder Kompatibilitätsgründen spezifizierte Verformungsgrenzen (elastisch oder plastisch) eingehalten werden müssen, ist eine Verformungsanalyse durchzuführen.

(2) Wenn eine plastische Spannungsanalyse gemäß B 2.2.2 durchgeführt wird, so ist auch eine Verformungsanalyse im Hinblick auf lokales Versagen durchzuführen.

H i n w e i s :

Weitere Hinweise zur Durchführung einer Verformungsanalyse im Hinblick auf lokales Versagen finden sich z. B. in ASME Code VIII, Division 2, Chapter 5.3.

B 2.4 Ermüdungsanalyse

B 2.4.1 Allgemeingültige Festlegungen

(1) Zur Vermeidung des Versagens infolge Ermüdung bei wechselnder Beanspruchung ist eine Ermüdungsanalyse durchzuführen. Hierbei wird im Folgenden zwischen elastischer und vereinfachter elastisch-plastischer Ermüdungsanalyse unterschieden.

H i n w e i s :

In der Praxis wird zunächst eine elastische Ermüdungsanalyse durchgeführt; im Bedarfsfall kann eine vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse durchgeführt werden. Eine elastisch-plastische Ermüdungsanalyse wird hier nicht behandelt, weil sie für Kernbauteile erfahrungsgemäß nicht erforderlich ist.

(2) Die methodische Vorgehensweise erfolgt in Anlehnung an KTA 3204.

H i n w e i s :

Das im KTA 3204, Abschnitt 6.2.4.2.3 sowie im Folgenden beschriebene Verfahren der Ermüdungsanalyse berücksichtigt folgende Einflussfaktoren nicht:

a) hochzyklische Belastungen infolge Schwingungsanregungen in Kombination mit Belastungen im Zeitfestigkeitsbereich (z. B. thermische Transienten),
b) mögliche Reduzierung der Dauerfestigkeit im ultrahochzyklischen Bereich ($N > 2 \cdot 10^7$),
c) Einfluss der Strahlung (insbesondere Neutronenbestrahlung),
d) Einfluss der Kaltverfestigung bei austenitischen Stählen im Zusammenhang mit den Mediumsbedingungen,
e) Langzeitwirkung von Wasserstoff.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand wird ein signifikanter Einfluss dieser Faktoren auf die Ermüdungsschädigung nicht unterstellt. Diese Einflussfaktoren sind Gegenstand der Forschung.

Eine Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren ist nach Vorliegen abgesicherter experimenteller Untersuchungen, falls erforderlich, vorgesehen.

(3) Eine elastische Ermüdungsanalyse ist nur dann zulässig, wenn die Vergleichsspannungsschwingbreite aus primären und sekundären Spannungen bei Stählen, Zirkoniumbasislegierungen und Nickelbasislegierungen den Wert $3 \cdot S_m$ sowie bei Stahlguss den Wert $4 \cdot S_m$ nicht überschreitet.

(4) Eine vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse darf angewendet werden für Lastspiele, in denen die Vergleichsspannungsschwingbreite aller primären und sekundären Spannungen die Grenze $3 \cdot S_m$ für Bauteile aus Stahl, Zirkoniumbasislegierungen und Nickelbasislegierungen sowie $4 \cdot S_m$ für Bauteile aus Stahlguss überschreiten, jedoch diese Grenzen von der Vergleichsspannungsschwingbreite der primären und sekundären Spannungen infolge mechanischer Belastungen eingehalten sind. Der Einfluss der Plastifizierung wird durch Verwendung des Faktors K_e nach B 2.4.3 berücksichtigt.

(5) Wenn eine vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse erforderlich ist, dann ist zu zeigen, dass kein Versagen infolge einer zyklisch fortschreitenden Deformation auftritt.

(6) Für die elastische und die vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse sind linearelastische Spannungen zu verwenden. Zur Absicherung gegen Ermüdung sind bei der Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite alle gleichzeitig wirkenden Spannungen aller Spannungskategorien zu berücksichtigen.

(7) Bewertungsgrundlage für die Ermüdungsanalyse sind werkstoffspezifisch zu ermittelnde Ermüdungskurven, welche den Vergleichsspannungsschwingbreiten zulässige Lastspielzahlen zuordnen.

(8) Bei der Ermüdungsanalyse sind die Beanspruchungen für alle relevanten Lastfälle zu überlagern.

H i n w e i s :

Lastfälle (Beanspruchungs-Zeit-Verläufe) können zu Lastkollektiven zusammengefasst werden.

B 2.4.2 Vergleichsspannungsschwingbreiten

(1) Es sind die folgenden Vergleichsspannungsschwingbreiten aus unterschiedlichen Spannungskategorien zu ermitteln:

$S_{n,PQ}$ - aus den gleichzeitig wirkenden primären und sekundären Spannungen

$S_{n,PQF}$ - aus allen gleichzeitig wirkenden Spannungen

(2) Die beiden folgenden Absätze beschreiben Rechenverfahren auf der Basis von Hauptspannungen. Alternativ dürfen

die Vergleichsspannungsschwingbreiten $S_{n,\,PQ}$ und $S_{n,\,PQF}$ auch aus Spannungstensoren in einem beliebigen Koordinatensystem bestimmt werden.

(3) Für jene Fälle, in denen sich in dem betreffenden Körperpunkt die Richtungen der Hauptspannungen während des Spannungszyklus nicht ändern, sind zunächst über die Zeit des Spannungszyklus Hauptspannungen $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ und $\sigma_3(t)$ zu bestimmen. Aus den drei Hauptspannungen sind dann die drei zeitabhängigen Hauptspannungsdifferenzen

$$\begin{aligned} S_{1,2}(t) &= \sigma_1(t) - \sigma_2(t) \\ S_{2,3}(t) &= \sigma_2(t) - \sigma_3(t) \\ S_{3,1}(t) &= \sigma_3(t) - \sigma_1(t) \end{aligned} \qquad \text{(B 2.4.2-1)}$$

zu bilden. Anschließend ist gemäß a) oder b) zu verfahren.

a) Vergleichsspannungsschwingbreiten $S_{n,\,PQ}$ oder $S_{n,\,PQF}$ nach von Mises sind nach folgender Vorschrift im Spannungszyklus über alle Zeitpunkte t_i und t_j zu bestimmen:

$$\max_{t_i,t_j} \sqrt{\frac{\left(S_{1,2}(t_i) - S_{1,2}(t_j)\right)^2 + \left(S_{2,3}(t_i) - S_{2,3}(t_j)\right)^2 + \left(S_{3,1}(t_i) - S_{3,1}(t_j)\right)^2}{2}} \qquad \text{(B 2.4.2-2)}$$

b) Vergleichsspannungsschwingbreite $S_{n,\,PQ}$ oder $S_{n,\,PQF}$ nach Tresca sind nach folgender Vorschrift im Spannungszyklus über alle Zeitpunkte t_i und t_j zu bestimmen:

$$\max_{t_i,t_j} \left\{ |S_{1,2}(t_i) - S_{1,2}(t_j)|, |S_{2,3}(t_i) - S_{2,3}(t_j)|, |S_{3,1}(t_i) - S_{3,1}(t_j)| \right\} \qquad \text{(B 2.4.2-3)}$$

(4) Für jene Fälle, in denen sich in dem betreffenden Körperpunkt die Richtungen der Hauptspannungen während des Spannungszyklus ändern, müssen zunächst für alle Zeitpunkte t_i und t_j im Spannungszyklus Differenzen von Normal- und von Schubspannungskomponenten bereit gehalten werden:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_X(t_i,t_j) &= \sigma_X(t_i) - \sigma_X(t_j) \\ \Delta\sigma_Y(t_i,t_j) &= \sigma_Y(t_i) - \sigma_Y(t_j) \\ \Delta\sigma_Z(t_i,t_j) &= \sigma_Z(t_i) - \sigma_Z(t_j) \\ \Delta\sigma_{XY}(t_i,t_j) &= \sigma_{XY}(t_i) - \sigma_{XY}(t_j) \\ \Delta\sigma_{YZ}(t_i,t_j) &= \sigma_{YZ}(t_i) - \sigma_{YZ}(t_j) \\ \Delta\sigma_{XZ}(t_i,t_j) &= \sigma_{XZ}(t_i) - \sigma_{XZ}(t_j) \end{aligned} \qquad \text{(B 2.4.2-4)}$$

Aus den sechs zeitabhängigen Differenzen von Spannungskomponenten sind dann von den Zeitpunkten t_i und t_j abhängige Hauptspannungen $\sigma_1(t_i,t_j)$, $\sigma_2(t_i,t_j)$ und $\sigma_3(t_i,t_j)$ zu bilden.

Aus den drei Hauptspannungen sind die drei möglichen, ebenfalls von t_i und t_j abhängigen, Differenzen zu bestimmen:

$$\begin{aligned} S_{1,2}(t_i,t_j) &= \sigma_1(t_i,t_j) - \sigma_2(t_i,t_j) \\ S_{2,3}(t_i,t_j) &= \sigma_2(t_i,t_j) - \sigma_3(t_i,t_j) \\ S_{3,1}(t_i,t_j) &= \sigma_3(t_i,t_j) - \sigma_1(t_i,t_j) \end{aligned} \qquad \text{(B 2.4.2-5)}$$

Hinweis:

(1) Die Richtungen der Hauptspannungen $\sigma_1(t_i,t_j)$, $\sigma_2(t_i,t_j)$ und $\sigma_3(t_i,t_j)$ ändern sich mit den Zeitpunkten t_i und t_j. Die Hauptspannungen sollen ihre Identität bei der Rotation behalten.

(2) Die größte Vergleichsspannungsschwingbreite wird durch Vergleich des Spannungszustandes zum Zeitpunkt t_i mit jedem Spannungszustand zum Zeitpunkt t_j gebildet.

Anschließend ist gemäß a) oder b) zu verfahren.

a) Vergleichsspannungsschwingbreiten $S_{n,\,PQ}$ und $S_{n,\,PQF}$ nach von Mises sind nach folgender Vorschrift im Spannungszyklus über alle Zeitpunkte t_i und t_j zu bestimmen:

$$\max_{t_i,t_j} \sqrt{\frac{S_{1,2}^2(t_i,t_j) + S_{2,3}^2(t_i,t_j) + S_{3,1}^2(t_i,t_j)}{2}} \qquad \text{(B 2.4.2-6)}$$

b) Vergleichsspannungsschwingbreiten $S_{n,\,PQ}$ und $S_{n,\,PQF}$ nach Tresca sind nach folgender Vorschrift im Spannungszyklus über alle Zeitpunkte t_i und t_j zu bestimmen:

$$\max_{t_i,t_j} \left\{ |S_{1,2}(t_i,t_j)|, |S_{2,3}(t_i,t_j)|, |S_{3,1}(t_i,t_j)| \right\} \qquad \text{(B 2.4.2-7)}$$

(5) Bei Schraubverbindungen sind für die Spannungserhöhung im Kerbgrund des Gewindes die Vergleichsspannungsschwingbreiten mit einem Faktor 4 zu multiplizieren, wenn kein günstigerer Wert nachgewiesen werden kann.

B 2.4.3 Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl

(1) Die werkstoffspezifischen Ermüdungskurven ordnen Spannungsschwingbreiten zulässige Lastspielzahlen zu.

Hinweis:

Die werkstoffspezifischen Ermüdungskurven (sog. Wöhlerkurven) wurden auf der Grundlage von einachsigen Dehnungswechselversuchen aufgestellt, wobei die Dehnungen mit dem Elastizitätsmodul multipliziert wurden, damit auf der Ordinate Spannungseinheiten (im plastischen Bereich fiktive Werte) angegeben werden können.

Beispiele für Ermüdungskurven für gängige Werkstoffe finden sich in Abschnitt B 5.

Für Brennelementstrukturteile aus Zirkonium-Legierungen wird dabei z. B. die Korrelation nach O' Donnell Langer (siehe Abb. B 5-4 und B 5-5) verwendet (Einflussfaktoren: Faktor 2 auf Spannungsamplitude, Faktor 20 auf Lastwechsel).

(2) Aus der ermittelten Vergleichsspannungsschwingbreite $S_{n,\,PQF}$ wird der Vergleichswert S_{alt} wie folgt ermittelt:

$$S_{alt} = x \cdot K_e \cdot S_{n,PQF} \qquad \text{(B 2.4.3-1)}$$

x = 1 oder 0,5 in Abhängigkeit der in der Ermüdungskurve verwendeten Definition der Ordinate (halbe oder volle Vergleichsspannungsschwingbreite)

$$K_e = 1{,}0 \text{ für } S_{n,PQ} \le 3 \cdot S_m \qquad \text{(B 2.4.3-2)}$$

$$K_e = 1{,}0 + \frac{(1-n)}{n \cdot (m-1)} \cdot \left(\frac{S_{n,PQ}}{3 \cdot S_m} - 1 \right) \qquad \text{(B 2.4.3-3)}$$

$$\text{für } 3 \cdot S_m < S_{n,PQ} < m \cdot 3 \cdot S_m$$

$$K_e = \frac{1}{n} \text{ für } S_{n,PQ} \ge m \cdot 3 \cdot S_m \qquad \text{(B 2.4.3-4)}$$

Hierbei sind m und n Materialparameter, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Art des Werkstoffes	m	n	T_{max} (°C)
Martensitischer, rostfreier Stahl	2,0	0,2	370
Austenitischer, rostfreier Stahl	1,7	0,3	425
Zirkoniumbasislegierung	1,7	0,3	425
Nickelbasislegierung	1,7	0,3	425

Tabelle B 2-1: Materialparameter für Werkstoffe

(3) Anstelle dieser K_e-Werte dürfen auch experimentell oder rechnerisch belegte oder aus der Literatur entnommene Werte verwendet werden. Bei Überschreitung der in der Tabelle angegebenen Maximaltemperatur sind die Werte für m und n geeignet anzupassen. Die Anwendbarkeit ist zu zeigen.

H i n w e i s :

Für K_e =1,0 handelt es sich um einen elastischen und für K_e > 1 um einen vereinfachten elastisch-plastischen Ermüdungsnachweis (Notwendigkeit der Prüfung gegen Versagen durch zyklisch fortschreitende Deformation).

Literatur [2] enthält einen Vorschlag zur Ermittlung von K_e-Werten.

(4) Wenn eine vereinfachte elastisch-plastische Ermüdungsanalyse durchgeführt wird, muss der verwendete Werkstoff ein Streckgrenzenverhältnis kleiner als 0,8 aufweisen.

(5) Die zulässige Lastspielzahl N_k ergibt sich für das Lastkollektiv k in Abhängigkeit vom ermittelten S_{alt} aus der Ermüdungskurve.

H i n w e i s :

Bei Überschreitung der maximal zulässigen Vergleichsspannungsschwingbreite ist die Bestimmung der zulässigen Lastspielzahl mit der verwendeten Ermüdungskurve nicht möglich.

B 2.4.4 Erschöpfungsgrad

(1) Ist n_k die spezifizierte oder anzunehmende Lastspielzahl des Lastkollektivs k, so ist der Erschöpfungsgrad D zu berechnen als:

$$D = \sum_k \frac{n_k}{N_k} \qquad \text{(B 2.4.4-1)}$$

(2) Der Erschöpfungsgrad ist auf Werte kleiner oder gleich 1 zu begrenzen.

(3) Der Mediumseinfluss ist in Abschnitt 4 komponentenspezifisch behandelt.

B 2.4.5 Analyse von fortschreitender Deformation

(1) Für die Bewertung der fortschreitenden Deformation ist die Vergleichsspannungsschwingbreite $S_{n,\,PQ}$ zu verwenden.

(2) Überschreitet die Vergleichsspannungsschwingbreite $S_{n,\,PQ}$ den Wert $3 \cdot S_m$, so ist zu zeigen, dass die mit den Belastungszyklen fortschreitende Deformation in zulässigen Grenzen bleibt, d. h. die Funktionsfähigkeit und Kompatibilität erhalten bleiben.

(3) Beim Nachweis der Begrenzung von zyklisch fortschreitender Deformation sind die gleichen Lastkollektive wie in der Ermüdungsanalyse zu berücksichtigen.

H i n w e i s :

Der Nachweis der Begrenzung zyklisch fortschreitender Deformationen kann in Anlehnung an die KTA 3201.2, Abschnitt 7.13 erfolgen.

B 2.5 Bewertung des Sprödbruchrisikos

(1) Bei erhöhten Verformungsgeschwindigkeiten, tiefen Temperaturen oder mehrachsigen Spannungszuständen inklusive Eigenspannungen kann ein Sprödbruchrisiko vorliegen.

(2) Es muss sichergestellt werden, dass während der gesamten Lebensdauer der Komponente die benötigte Verformungsfähigkeit (insbesondere bei plastischen Verformungen) gewährleistet ist.

H i n w e i s :

Weitere Hinweise zur Durchführung einer Sprödbruchanalyse finden sich z. B. in KTA 3201.2.

B 2.6 Stabilitätsanalyse

B 2.6.1 Allgemeines

(1) Wenn unter Einwirkung einer Druckbeanspruchung eine plötzliche Verformung ohne wesentliche Laststeigerung zu erwarten ist, muss eine Stabilitätsanalyse durchgeführt werden.

H i n w e i s :

Ein Stabilitätsversagen von Platten, Schalen oder stabförmigen Strukturen, kann u. a. durch Beulen oder Knicken erfolgen.

(2) Für die Fälle Beulen zylindrischer Bauteile und Knicken stabförmiger Strukturen sind in den folgenden Abschnitten Festlegungen getroffen.

B 2.6.2 Beulen von druckbeaufschlagten zylindrischen Bauteilen

(1) Bei äußerem Überdruck muss die Druckbelastung Δp unter Berücksichtigung eines komponentenspezifischen Sicherheitsfaktors kleiner sein als der kritische elastische Beuldruck $p_{krit,el}$ und kleiner sein als der kritische plastische Verformungsdruck $p_{krit,pl}$. Die Druckbelastung Δp ist die Druckdifferenz zwischen Außen- und Innendruck.

(2) Der kritische elastische Beuldruck wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$p_{krit,el} = \frac{E}{4 \cdot \left(1 - \nu^2\right)} \cdot \left(\frac{h_{min}}{r_{H,mittel}} \right)^3 \qquad \text{(B 2.6.2-1)}$$

mit:

$p_{krit,el}$ = kritischer elastischer Beuldruck (N/mm²)

E = Elastizitätsmodul (N/mm²)

ν = Querkontraktionszahl

h_{min} = lokale minimale Wanddicke unter Berücksichtigung der Einsatzzeit (mm)

$r_{H,mittel}$ = mittlerer Radius der Hohlzylinderwand (mm)

(3) Der geforderte Sicherheitsfaktor S_{el} wird komponentenspezifisch in den Tabellen B 4-1 und B 4-2 angegeben.

(4) Es ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$\Delta p \le \frac{p_{krit,el}}{S_{el}} \qquad \text{(B 2.6.2-2)}$$

(5) Der kritische plastische Verformungsdruck $p_{krit,pl}$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$p_{krit,pl} = 2 \cdot \frac{h_{min} \cdot R_{p0,2T}}{\left(D_a - h_{min}\right)} \qquad \text{(B 2.6.2-3)}$$

mit:

$p_{krit,pl}$ = kritischer plastischer Verformungsdruck (N/mm²)

h_{min} = lokale minimale Wanddicke unter Berücksichtigung der Einsatzzeit (mm)

$R_{p0,2T}$ = 0,2-Dehngrenze des Hüllrohrwerkstoffs bei Betriebstemperatur (N/mm²)

D_a = Außendurchmesser des Hüllrohres (mm)

(6) Der geforderte Sicherheitsfaktor S_{pl} wird komponentenspezifisch in den **Tabellen B 4-1** und **B 4-2** angegeben.

(7) Es ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$\Delta p \le \frac{p_{krit,pl}}{S_{pl}} \qquad \text{(B 2.6.2-4)}$$

B 2.6.3 Knicken stabförmiger Strukturen

(1) Axiale Druckbeanspruchungen können zum Knicken von Bauteilen führen. Die Druckspannungen σ_{Druck} müssen so begrenzt bzw. das Bauteil so ausgelegt werden, dass diese instabilen Zustände nicht auftreten.

(2) Die kritische Knickspannung σ_{knick} ist bauteilspezifisch und unter Berücksichtigung des Spannungszustandes zu bestimmen.

Hinweis:

Beim rein elastischen Knicken kann die kritische Knickspannung entsprechend der Eulerhyperbel ermittelt werden, soweit der Schlankheitsgrad größer ist als der Grenzschlankheitsgrad. Geeignete Näherungsverfahren sind ansonsten z. B. Engesser-v. Kármán oder Tangentenmodul.

(3) Der Einfluss von geometrischen und strukturellen Imperfektionen (nach DIN EN 1993-1-1) ist zu berücksichtigen, wenn sie zu einer Vergrößerung der Beanspruchung führen. Dies kann erfolgen durch

a) explizite Berücksichtigung der Imperfektionen bei der Ableitung der kritischen Knickspannung oder

b) eine geeignete Wahl der Sicherheitsbeiwerte S_k

Hinweis:

Die in den **Tabellen B 4-1** und **B 4-2** komponentenspezifisch angegebenen Sicherheitsbeiwerte S_k sind geeignet für Nachweise, die entsprechend der Theorie keine Imperfektionen berücksichtigen (z. B. Euler oder Tangentenmodul).

(4) Der Einfluss von im Reaktoreinsatz entstehenden bleibenden Geometrieänderungen (z. B. Kriechverformungen) auf die Stabilität des Bauteils ist zu bewerten und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Hinweis:

Bei größeren Geometrieänderungen liegt kein Stabilitätsproblem im engeren Sinne vor. Der Stabilitätsnachweis kann durch einen Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung, sowie den Nachweis, dass die resultierende Deformation die Funktion des Bauteils nicht unzulässig beeinträchtigt, ersetzt werden.

(5) Es ist folgende Bedingung einzuhalten:

$$\sigma_{Druck} \leq \frac{\sigma_{knick}}{S_k} \qquad \text{(B 2.6.3-1)}$$

(6) Der in den **Tabellen B 4-1** und **B 4-2** komponentenspezifisch angegebene Sicherheitsbeiwert S_k gegen Knicken ist dann anzuwenden, wenn bei der Ermittlung der kritischen Knickspannung keine Imperfektionen berücksichtigt wurden (z. B. Euler oder Tangentenmodul).

B 2.7 Nachweise für Verbindungselemente

B 2.7.1 Allgemeines

Im Folgenden werden analytische Nachweise für Schraubverbindungen und Schweißverbindungen behandelt. Für andere Verbindungsarten sind geeignete Verfahren wie z. B. experimentelle Nachweisverfahren zu nutzen.

B 2.7.2 Schraubverbindungen

(1) Für Schraubverbindungen ist der Ort höchster Beanspruchung zu ermitteln, wobei die verschiedenen Versagensmechanismen zu beachten sind.

Hinweis:

Versagensmechanismen sind z. B.

- Abscheren des Schraubenkopfes bei zu geringer Kopfhöhe,
- Abstreifen des Gewindes bei zu geringer Einschraubtiefe,
- Abreißen oder Abscheren des Schraubenschaftes bei zu geringer Schaftdicke und
- Bruch im freien belasteten Gewindequerschnitt.

(2) Die für Schraubverbindungen geltenden Beanspruchungsgrenzen sind in den **Tabellen B 4-1** und **B 4-2** für die Sicherheitsebenen 1 bis 3 angegeben. Für die Beanspruchungen im Rahmen der Montage sind die Werte der Sicherheitsebene 1 anzusetzen.

(3) Weitere Informationen zur Konstruktion und Auslegung von Schraubverbindungen finden sich in der VDI 2230.

(4) Für Schraubverbindungen ist eine Ermüdungsanalyse entsprechend B 2.4 durchzuführen.

B 2.7.3 Schweißverbindungen

(1) Für Schweißverbindungen ist ein Spannungsnachweis entsprechend B 2.2 durchzuführen. Dabei sind die zulässigen primären Vergleichsspannungen für Schweißnähte zu bilden aus der zulässigen primären Vergleichsspannung des Grundmaterials multipliziert mit den Schweißnahtbeiwerten v und v_1 für die Beanspruchungsart und v_2 für die Nahtgüte. Die Schweißnahtbeiwerte sind der **Tabelle B 4-1** zu entnehmen.

(2) Für Schweißverbindungen ist eine Ermüdungsanalyse entsprechend B 2.4 durchzuführen.

B 3 Auslegung mit experimentellen Methoden

(1) Für experimentelle Nachweise gelten die Festlegungen des Abschnitts 5.1.3 (5).

(2) Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die realen Verhältnisse entsprechend den Festlegungen des Abschnitts 5.1.3 (5) b) bis d) darf als erfüllt angenommen werden, wenn anhand eines Versuchs an einem Prototypen oder an einem Modell unter Berücksichtigung seines Maßstabs nachgewiesen werden kann, dass die spezifizierten Lasten

a) auf den Sicherheitsebenen 1 und 2: 44 % und

b) auf den Sicherheitsebenen 3 und 4: 90 %

der im Versuch ermittelten Bruch- oder Versagenslast oder der erreichten Versuchslast nicht überschreiten.

Hinweis:

Die Berücksichtigung der unter a) und b) getroffenen Festlegungen soll sicherstellen, dass die aus dem Versuch ermittelten Lasten eine konservative Wiedergabe der Tragfähigkeit der tatsächlichen Struktur bei den spezifizierten Belastungen darstellen.

B 4 Tabellen der Sicherheitsbeiwerte

B 4-1 Tabelle der Sicherheitsbeiwerte und der zulässigen Spannungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2

<table>
<tr><td>Schutzziele</td><td colspan="5">Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der BE, Einschluss radioaktiver Stoffe, Begrenzung der Strahlenexposition</td></tr>
<tr><td>Sicherheitsebenen</td><td colspan="5">Sicherheitsebenen 1 und 2</td></tr>
<tr><td>Komponenten</td><td>Brennstab</td><td>Brennelementstruktur [3)]</td><td>Absorberstabhüllrohr (DWR)</td><td>Steuerelementstruktur (DWR + SWR) und absorberführende Teile (SWR)</td><td>Drosselköper</td></tr>
<tr><td>Elastisches Beulen zylindrischer Bauteile</td><td colspan="3">$S_{el} = 3$ für $U \geq 0{,}015$
$S_{el} = 2 \cdot 100 \cdot U$ für $0{,}01 \leq U < 0{,}015$
$S_{el} = 2$ für $U < 0{,}01$
Dabei ist U die Unrundheit des Rohres.
Die Unrundheit ist folgendermaßen zu bestimmen:
$U = 2 \cdot \frac{d_{i,max} - d_{i,min}}{d_{i,max} + d_{i,min}}$
mit:
U : Unrundheit
$d_{i,max}$: maximaler Innendurchmesser
$d_{i,min}$: minimaler Innendurchmesser</td><td>nicht relevant für die Steuerelementstruktur (DWR)
Der Nachweis für das SWR Steuerelement ist in Abhängigkeit von der Geometrie und den Randbedingungen zu führen</td><td>siehe SE-Struktur</td></tr>
<tr><td>Plastisches Verformen (plastisches Beulen)</td><td>S_{pl} =1,1</td><td>nicht relevant</td><td>S_{pl} = 1,5</td><td>nicht relevant für die Steuerelementstruktur (DWR)
Der Nachweis für das SWR Steuerelement ist in Abhängigkeit von der Geometrie und den Randbedingungen zu führen</td><td>nicht relevant</td></tr>
</table>

Tabelle B 4-1: Sicherheitsbeiwerte und zulässige Spannungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2 (Fortsetzung siehe Folgeseiten)

Komponenten	Brennstab	Brennelementstruktur [3]		Absorberstabhüllrohr (DWR)	Steuerelementstruktur (DWR + SWR) und absorberführende Teile (SWR)	Drosselköper
Elastisches Knicken nach Euler / plastisches Knicken nach Engesser-v. Kármán	S_k =1,5	S_k = 1,5		nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
zulässige Spannungen für die Spannungskategorien[1]		austenitischer Stahl (geschmiedet oder Feinguss) Nickelbasislegierung	Zirkoniumbasislegierung			
Pm	S_1 = Min{0,9 $R_{p0,2T}$;0,5 R_{mT}}	S_1 = Min{$R_{p0,2RT}$/1,5 ; $R_{p0,2T}$/1,1; R_{mRT}/3,0 ; R_{mT}/2,7} Feinguss: S_1 = Min{$R_{p0,2T}$/2; R_{mRT}/4,0 ; R_{mT}/3,6}	S_1 = Min{0,7 $R_{p0,2T}$; 0,5 R_{mT}}	S_1 = Min{0,9 $R_{p0,2T}$;0,5 R_{mT}}	S_1 = Min{$R_{p0,2RT}$/1,5 ; $R_{p0,2T}$/1,1; R_{mRT}/3,0 ; R_{mT}/2,7}	siehe SE-Struktur
Pm+Pb	S_2 = Min{1,35 $R_{p0,2T}$;0,7 R_{mT}}	S_2 = 1,5 S_1	S_2 = Min{1,0 $R_{p0,2T}$; 0,7 R_{mT}}	S_2 = Min{1,35 $R_{p0,2T}$;0,7 R_{mT}}	S_2 = 1,5 S_1	siehe SE-Struktur
Pm+Pb+Q	S_3 = Min{2,7 $R_{p0,2T}$;1,0 R_{mT}}	S_3 = 3,0 S_1 Feinguss: S_3 = 4,0 S_1	S_3 = Min{2,1 $R_{p0,2T}$; 1,0 R_{mT}}	S_3 = Min{2,7 $R_{p0,2T}$;1,0 R_{mT}}	S_3 = 3,0 S_1	siehe SE-Struktur
Schweißverbindungen	Für statische Beanspruchung: S_1^* = $S_1 \cdot v \cdot v_2$ S_2^* = $S_2 \cdot v \cdot v_2$ Für dynamische Beanspruchung: S_1^* = $S_1 \cdot v_1 \cdot v_2$ S_2^* = $S_2 \cdot v_1 \cdot v_2$ mit: v : Beiwert für statische Beanspruchung (siehe Tabelle 5.1 aus KTA 3905) v_1 : Beiwert für dynamische Beanspruchung (siehe Niemann [3]) = 0,1 bis 1,0 in Abhängigkeit von Nahtform und Beanspruchungsart v_2 : Beiwert für Nahtgüte = 1,0 bei nachgewiesener Nahtgüte = 0,5 ohne Nahtgüteangaben					

Tabelle B 4-1: Sicherheitsbeiwerte und zulässige Spannungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2 (Fortsetzung)

Komponenten	Brennstab	Brennelementstruktur [3]	Absorberstabhüllrohr (DWR)	Steuerelementstruktur (DWR + SWR) und absorberführende Teile (SWR)	Drosselköper
Vergleichsspannungen in Schraubverbindungen	nicht relevant	$S = 1{,}0\ R_{p0,2T}$	$S = 1{,}0\ R_{p0,2T}$	$S = 1{,}0\ R_{p0,2T}$	siehe SE-Struktur
Scherspannungen in Schraubverbindungen	nicht relevant	$S = 0{,}6\ R_{p0,2T}$	$S = 0{,}6\ R_{p0,2T}$	$S = 0{,}6\ R_{p0,2T}$	siehe SE-Struktur
Flächenpressungen	nicht relevant	$S = 1{,}5\ R_{p0,2T}$	$S = 1{,}5\ R_{p0,2T}$	$S = 1{,}5\ R_{p0,2T}$	siehe SE-Struktur
Schubspannungen in Druckfedern[4]	$S = 0{,}56\ R_{mT}$	$S = 0{,}56\ R_{mT}$	nicht relevant	$S = 0{,}56\ R_{mT}$	siehe SE-Struktur
Ermüdungsbetrachtung	$D^{2)} \leq 1$	$D^{2)} \leq 1$	$D^{2)} \leq 1$	$D^{2)} \leq 1$	siehe SE-Struktur

1) Index 1 = Vergleichsspannung aus den primären Membranspannungen
Index 2 = Vergleichsspannung aus den primären Membran- und Biegespannungen
Index 3 = Vergleichsspannung aus den primären und sekundären Membran- und Biegespannungen

S_m wird in Abschnitt B 2.4 verwendet
$S_m = S_3 / 3$ für alle betrachteten Werkstoffe außer austenitischen Feinguss
$S_m = S_3 / 4$ fur austenitischen Feinguss

2) Erschöpfungsgrad $D = \Sigma_k$ (anzunehmende Lastspielzahl n_k / zulässige Lastspielzahl N_k) des Lastkollektivs k

3) inkl. Brennelementkästen (SWR)

4) Spannung (unkorrigiert bei statischer Belastung und korrigiert bei dynamischer Belastung nach DIN EN 13906-1) beim konstruktiv maximal möglichen Federweg

Tabelle B 4-1: Sicherheitsbeiwerte und zulässige Spannungen für die Sicherheitsebenen 1 und 2 (Fortsetzung)

B 4-2 Tabelle der Sicherheitsbeiwerte und der zulässigen Spannungen für die Sicherheitsebene 3

Schutzziele	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der BE, Einschluss radioaktiver Stoffe, Begrenzung der Strahlenexposition					
Sicherheitsebenen	Sicherheitsebene 3					
Komponenten	Brennstab	Brennelementstruktur [2]		Absorberstabhüllrohr (DWR)	Steuerelementstruktur (DWR + SWR) und absorberführende Teile (SWR)	Drosselkörper
Elastisches Beulen	nicht relevant	nicht relevant		nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
Plastisches Verformen	nicht relevant	nicht relevant		nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
Elastisches Knicken nach Euler / plastisches Knicken nach Engesser-v. Kármán	$S_k > 1{,}1$	$S_k > 1{,}1$		nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
zulässige Spannungen für die Spannungskategorien[1]		austenitischer Stahl (geschmiedet oder Feinguss) Nickelbasislegierung	Zirkoniumbasis-legierung			
Vergleichsspannungen [1] Pm Pm+Pb	$S'_1 =$ Min{$R_{p0,2T}$, 0,7 R_{mT}} $S'_2 =$ Min{1,5 $R_{p0,2T}$; R_{mT}}	$S'_1 =$ Min{2,4 S_1; 0,7 R_{mT}} $S'_2 =$ Min{3,6 S_1; R_{mT}}	$S'_1 = 0{,}7\ R_{mT}$ $S'_2 = 1{,}0\ R_{mT}$	$S'_1 =$ Min{$R_{p0,2T}$; 0,7 R_{mT}} $S'_2 =$ Min{1,5 $R_{p0,2T}$; R_{mT}}	$S'_1 =$ Min{$R_{p0,2T}$; 0,7 R_{mT}} $S'_2 =$ Min{1,5 $R_{p0,2T}$; R_{mT}}	nicht relevant
Schweißverbindungen	Für statische Beanspruchung: $S_1^{*'} = S_1' \cdot v \cdot v_2$ $S_2^{*'} = S_2' \cdot v \cdot v_2$ Für dynamische Beanspruchung: $S_1^{*'} = S_1' \cdot v_1 \cdot v_2$ $S_2^{*'} = S_2' \cdot v_1 \cdot v_2$ mit: v : Beiwert für statische Beanspruchung (siehe Tabelle 5.1 aus KTA 3905) v_1 : Beiwert für dynamische Beanspruchung (siehe Niemann [3]) = 0,1 bis 1,0 in Abhängigkeit von Nahtform und Beanspruchungsart v_2 : Beiwert für Nahtgüte = 1,0 bei nachgewiesener Nahtgüte = 0,5 ohne Nahtgüteangaben					nicht relevant

Tabelle B 4-2: Sicherheitsbeiwerte und zulässige Spannungen für die Sicherheitsebene 3 (Fortsetzung siehe Folgeseite))

Komponenten	Brennstab	Brennelementstruktur [2)]	Absorberstabhüllrohr (DWR)	Steuerelementstruktur (DWR + SWR) und absorberführende Teile (SWR)	Drosselkörper
Vergleichsspannungen in Schraubverbindungen	nicht relevant	$S = 1{,}1\ R_{p0,2T}$	nicht relevant	$S = 1{,}1\ R_{p0,2T}$	$S = 1{,}1\ R_{p0,2T}$
Scherspannungen in Schraubverbindungen	nicht relevant	$S = 0{,}7\ R_{p0,2T}$	nicht relevant	$S = 0{,}7\ R_{p0,2T}$	$S = 0{,}7\ R_{p0,2T}$
Flächenpressungen	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
Schubspannungen in Druckfedern	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant

1) Index 1 = Vergleichsspannung aus den primären Membranspannungen
Index 2 = Vergleichsspannung aus den primären Membran- und Biegespannungen

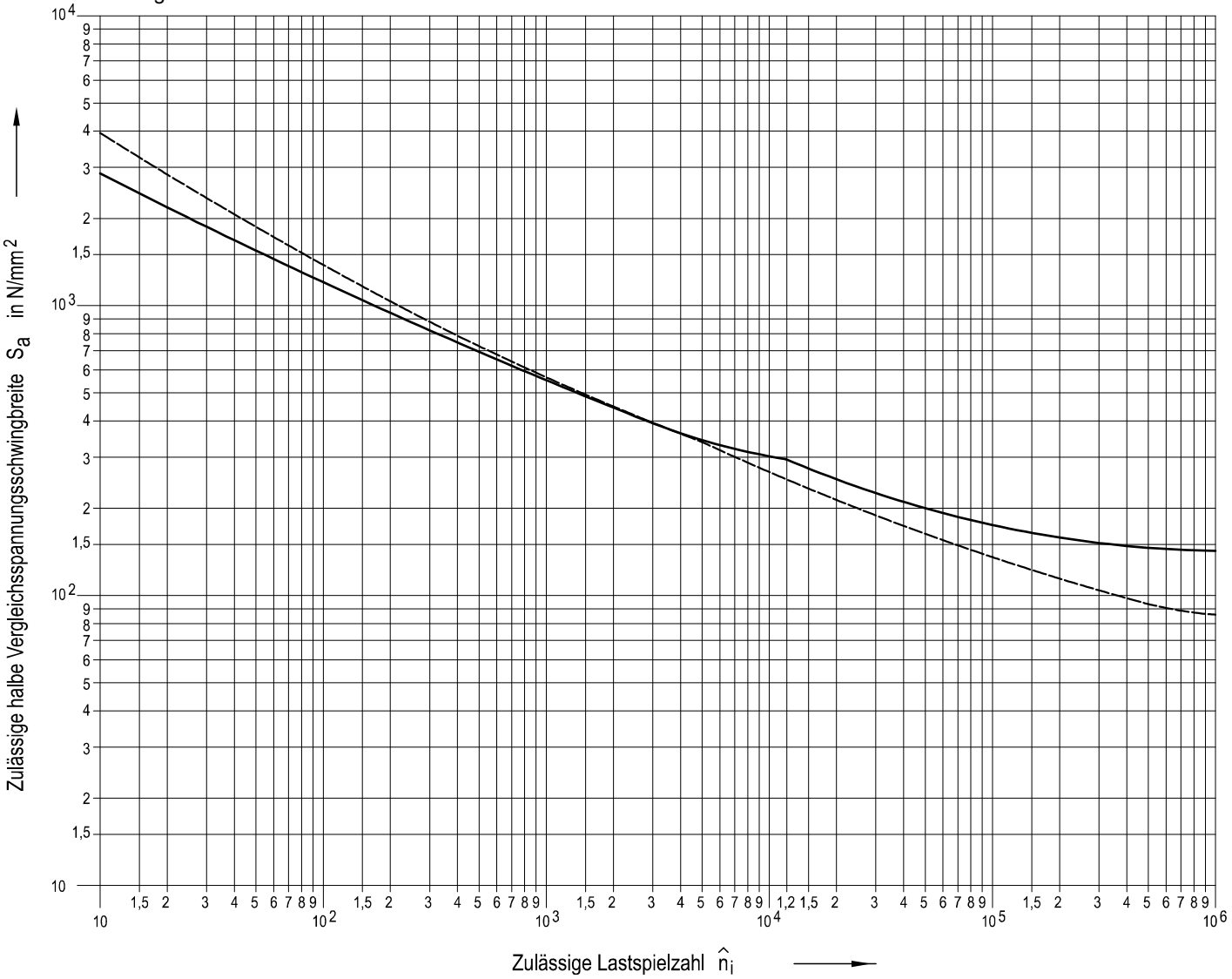
2) incl. Brennelementkästen (SWR)

Tabelle B 4-2: Sicherheitsbeiwerte und zulässige Spannungen für die Sicherheitsebene 3 (Fortsetzung)

B 5 Ermüdungskurven

Die Ermüdungskurven **Bild B 5.1** bis **Bild B 5.3** sind aus KTA 3201.2 übernommen. Die genauen und verbindlichen Werte für den Zusammenhang zwischen S_a und $\hat{n}_i$ sind in KTA 3201.2, Tabelle 7.8-2 angegeben. Die Ermüdungskurven **Bild B 5.4** und **Bild B 5.5** stammen aus [7]. Die genauen und verbindlichen Werte für den Zusammenhang zwischen S_a und $\hat{n}_i$ sind in Abschnitt B 5.6 angegeben.

B 5.1 Ermüdungskurven für ferritische Stähle



$R_m \leq 550$ N/mm²

$R_m = 790$ bis 900 N/mm²

$E = 2{,}07 \cdot 10^5$ N/mm²

Werte für Zugfestigkeiten zwischen 550 N/mm² und 790 N/mm² dürfen linear interpoliert werden.

Liegen der berechneten Spannungsschwingbreite Dehnungen mit einem E-Modul $E_T \neq E$ zugrunde, so ist die berechnete Spannungsschwingbreite mit dem Quotienten E/E_T zu multiplizieren.

Bild B 5-1: Ermüdungskurven für ferritische Stähle

B 5.2 Ermüdungskurven für die austenitischen Stähle 1.4550 und 1.4541

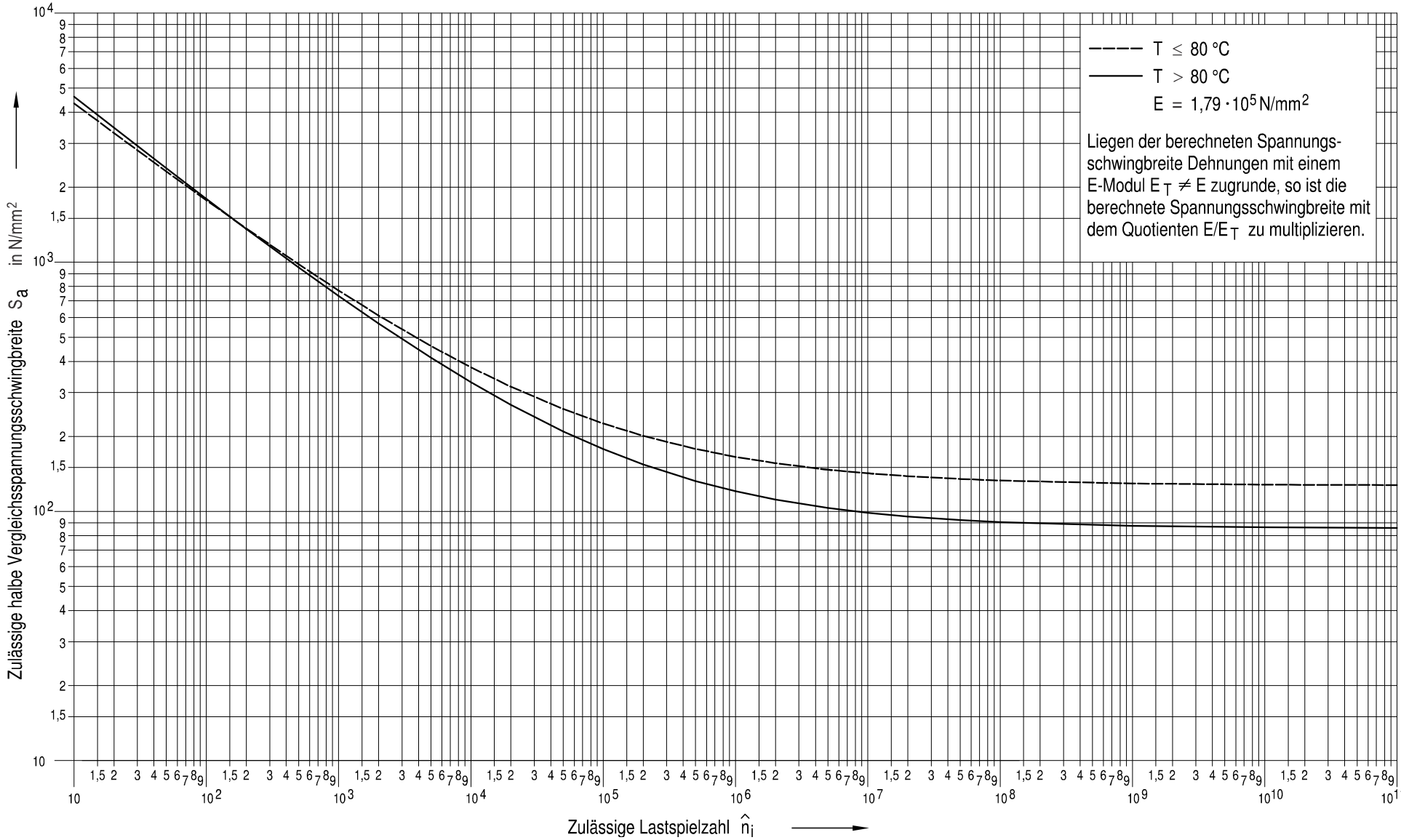


Bild B 5-2: Ermüdungskurven für die austenitischen Stähle 1.4550 und 1.4541

B 5.3 Ermüdungskurven für austenitische Stähle außer den Stählen 1.4550 und 1.4541

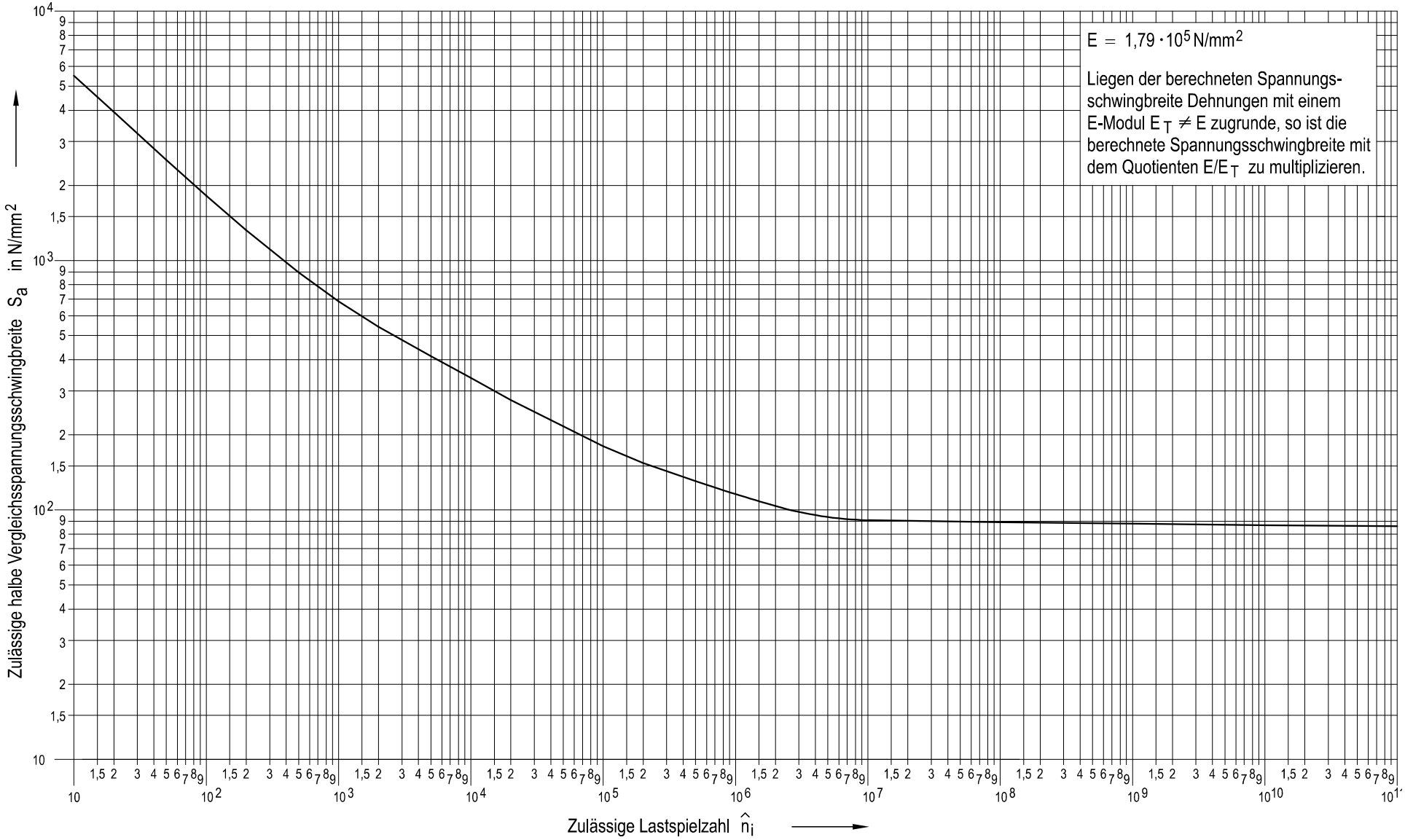


Bild B 5-3: Ermüdungskurve für austenitische Stähle außer den Stählen 1.4550 und 1.4541

B 5.4 Ermüdungskurven für unbestrahltes Zircaloy-2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C

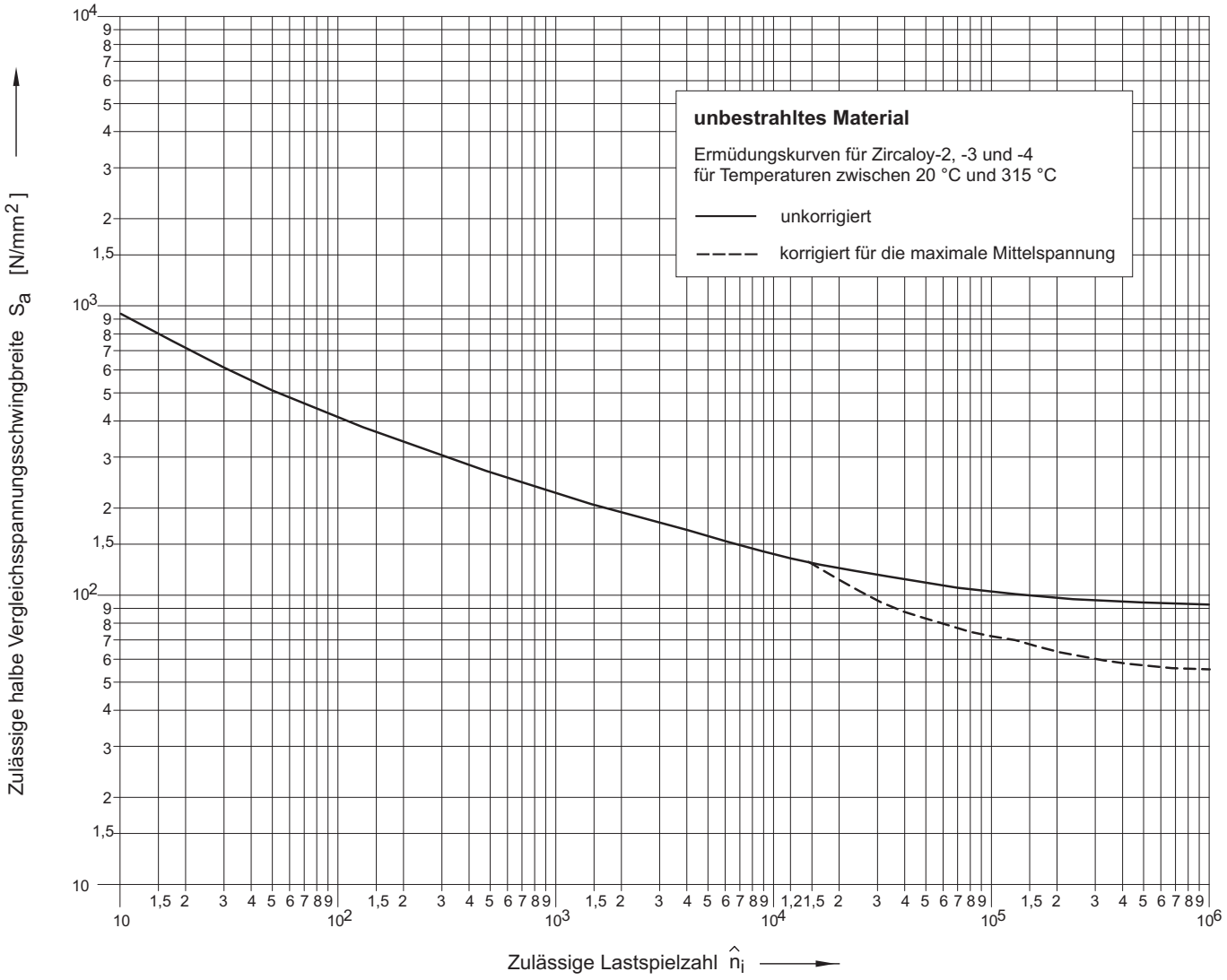


Bild B 5-4: Ermüdungskurven für unbestrahltes Zircaloy- 2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C

B 5.5 Ermüdungskurven für bestrahltes Zircaloy- 2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C

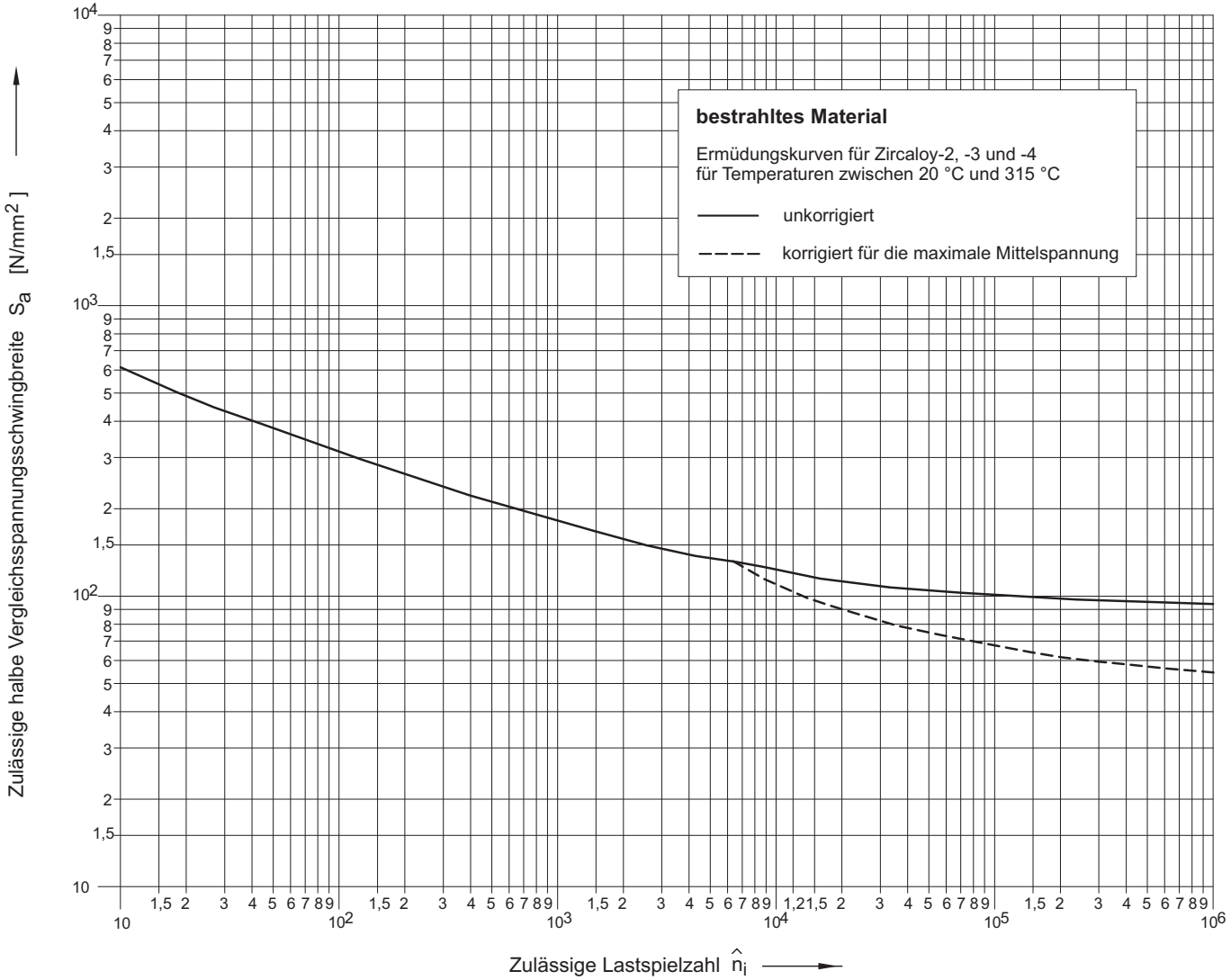


Bild B 5-5: Ermüdungskurven für bestrahltes[1)] Zircaloy- 2, 3 und 4 für Temperaturen zwischen 20 °C und 315 °C

[1)] Die Bestrahlung erfolgte unter DWR-Bedingungen bis zu einer Fluenz schneller Neutronen von $5{,}5 \cdot 10^{21}$ n/cm².

B 5.6 Tabellenwerte und Berechnungsvorschrift für die Ermüdungskurven für unbestrahltes und bestrahltes Zirkaloy- 2, 3, und 4

		Zulässige halbe Vergleichsspannungsschwingbreite S_a in N/mm^2 bei zulässiger Lastspielzahl $\hat{n}$																	
		$1{\cdot}10^1$	$2{\cdot}10^1$	$5{\cdot}10^1$	$1{\cdot}10^2$	$2{\cdot}10^2$	$5{\cdot}10^2$	$1{\cdot}10^3$	$2{\cdot}10^3$	$5{\cdot}10^3$	$6{,}8{\cdot}10^3$	$1{\cdot}10^4$	$1{,}5{\cdot}10^4$	$2{\cdot}10^4$	$5{\cdot}10^4$	$1{\cdot}10^5$	$2{\cdot}10^5$	$5{\cdot}10^5$	$1{\cdot}10^6$
Bild 5-4	unkorrigiert	949,0	719,0	516,0	418,0	342,6	269,6	228,0	195,4	162,1	-	140,8	-	126,9	112,2	104,3	99,1	95,1	93,8
	korrigiert für die maximale Mittelspannung	949,0	719,0	516,0	418,0	342,6	269,6	228,0	195,4	162,1	-	140,8	130,0	113,4	84,2	72,4	64,5	58,1	55,3
Bild 5-5	unkorrigiert	613,0	490,0	379,5	316,0	263,5	213,0	181,5	157,3	135,6	-	122,2	-	112,5	104,6	100,7	98,1	95,6	94
	korrigiert für die maximale Mittelspannung	613,0	490,0	379,5	316,0	263,5	213,0	181,5	157,3	135,6	129,1	110,9	-	90,2	74,8	67,6	62,0	57,5	54,0

(1) Die Stützpunkte bei $\hat{n} = 6{,}8{\cdot}10^3$ und $\hat{n} = 1{,}5{\cdot}10^4$ wurden zwecks genauerer Darstellung des Kurvenverlaufs zusätzlich angegeben.

(2) Zwischen den Tabellenwerten darf bei doppeltlogarithmischer Darstellung linear interpoliert werden (im doppeltlogarithmischen Diagramm: Geradenstücke zwischen den Stützpunkten). Ist für einen gegebenen Wert $S_a = S$ die zugehörige Lastspielzahl $\hat{n}$ zu ermitteln, dann geschieht dies mit Hilfe der benachbarten Stützwerte $S_j < S < S_i$ und $\hat{n}_j > \hat{n} > \hat{n}_i$ wie folgt:

$$\hat{n} / \hat{n}_i = \left(\hat{n}_j / \hat{n}_i\right)^{\log \frac{S_i}{S} / \log \frac{S_i}{S_j}}$$

Beispiel: gegeben: Zirkaloy 4, unbestrahlt (Bild 5-4), $S_a = S = 180$ N/mm^2

daraus folgt: $S_i = 195{,}4$ N/mm^2, $S_j = 162{,}1$ N/mm^2, $\hat{n}_i = 2{\cdot}10^3$, $\hat{n}_j = 5{\cdot}10^3$

$$\hat{n} / 2000 = (5000 / 2000)^{\log \frac{195{,}4}{180} / \log \frac{195{,}4}{162{,}1}}$$

$$\hat{n} = 2991$$

Tabelle B-1: Wertetabelle für die zulässige halbe Vergleichsspannungsschwingbreite S_a für die Ermüdungskurven aus **Bild B 5-4** (unbestrahltes Zircaloy-2, 3 und 4) und **Bild B 5-5** (bestrahltes[1)] Zircaloy-2, 3 und 4)

[1)] Die Bestrahlung erfolgte unter DWR-Bedingungen bis zu einer Fluenz schneller Neutronen von $5{,}5 \cdot 10^{21}$ n/cm^2.

Anhang C

Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird

(Die Verweise beziehen sich nur auf die in diesem Anhang angegebene Fassung. Darin enthaltene Zitate von Bestimmungen beziehen sich jeweils auf die Fassung, die vorlag, als die verweisende Bestimmung aufgestellt oder ausgegeben wurde.)

AtG		Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 14) geändert worden ist
StrlSchG		Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz) Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15) geändert worden ist
StrlSchV		Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung) Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645) geändert worden ist
SiAnf	(2015-03)	Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2), die zuletzt mit Bekanntmachung des BMUV vom 25. Februar 2022 (BAnz AT 15.03.2022 B3) geändert worden ist
Interpretationen	(2015-03)	Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012, vom 29. November 2013 (BAnz AT 10.12.2013 B4), geändert am 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B3)
KTA 3101.1	(2022-11)	Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren; Teil 1: Grundsätze der thermohydraulischen Auslegung
KTA 3101.2	(2012-11)	Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren; Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme
KTA 3103	(2015-11)	Abschaltsysteme von Leichtwasserreaktoren
KTA 3107	(2014-11)	Anforderungen an die Kritikalitätssicherheit beim Brennelementwechsel
KTA 3201.2	(2017-11)	Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
KTA 3204	(2017-11)	Reaktordruckbehälter-Einbauten
KTA 3602	(2003-11)	Lagerung und Handhabung von Brennelementen und zugehörigen Einrichtungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren
KTA 3905	(2020-12)	Lastanschlagpunkte an Lasten in Kernkraftwerken
DIN EN 1993-1-1	(2010-12)	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
DIN EN 13906-1	(2013-11)	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion - Teil 1: Druckfedern; Deutsche Fassung EN 13906-1:2013
ISO 16269-6	(2014-01)	Statistische Auswertung von Daten Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen
VDI-2230 Blatt 1	(2015-11)	Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindungen
ASME Code VIII	(2010)	2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for the Construction of Pressure Vessels

Literatur

[1] Chopra, O. and Stevens, G. J.: Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, NUREG/CR-6909 Rev. 1, ANL-12/60, March 2014, Draft Report for Comment *http://*pbadupws.*nrc.gov/docs/ML1408/ML14087A068.pdf*

[2] Hübel, H.: Erhöhungsfaktor K_e zur Ermittlung plastischer Dehnungen aus elastischer Berechnung, Technische Überwachung 35 (1994) Nr. 6, S. 268-278

[3] Niemann, G. et al.: Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen; Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 2005, 4. Auflage

[4] Wiehr, K.: REBEKA-Bündelversuche - Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zircaloyhüllen und einsetzender Kernnotkühlung (Abschlussbericht), Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, KfK 4407, Mai 1998, ISSN 0303-4003.

[5] CSNI Technical Opinion papers No. 13, LOCA criteria Basis and Test Methodology, ISBN 978-92-64-99154-5, OECD 2011

[6] Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal During the Loss of Coolant Accident (NUREG-2121), prepared by Patrick A.C. Reynaud; Office of Nuclear Regulatory Research

[7] W.J.O'Donnel and B.F.Langer: Fatigue design basis for Zircaloy Components, Nuclear Science and Engineering: 20, 1-12 (1964)